

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISMINUCIÓN DE IMPUREZAS DE HIERRO PRESENTES EN ARENAS SILÍCEAS, ARENERA EL POZOTE, TINAQUILLO, ESTADO COJEDES

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Rivas Ch., José L.
para optar al Título de Ingeniero de Minas

Caracas, Agosto de 2006

© José Luis Rivas Chavarría, 2006

Hecho el Depósito de Ley.
Depósito Legal N° 0000000000

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISMINUCIÓN DE IMPUREZAS DE HIERRO PRESENTES EN ARENAS SILÍCEAS, ARENERA EL POZOTE, TINAQUILLO, ESTADO COJEDES

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Mónica Martiz

COTUTOR ACADÉMICO: Prof. Carlo Di Yorio

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. Rivas Ch., José L.
para optar al Título de Ingeniero de Minas

Caracas, Agosto de 2006

Caracas, Agosto de 2006

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería de Minas, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller José L. Rivas Ch., titulado:

“Disminución de Impurezas de Hierro Presentes en Arenas Silíceas, Arenera El Pozote, Tinaquillo, Estado Cojedes”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero de Minas, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Miguel Castillejo
Jurado

Prof. Luis Chacón
Jurado

Prof. Mónica Martiz
Tutor Académico

Prof. Carlo Di Yorio
Co-Tutor

RIVAS CH., JOSÉ L.

DISMINUCIÓN DE IMPUREZAS DE HIERRO PRESENTES EN ARENAS SILÍCEAS, ARENERA EL POZOTE, TINAQUILLO, ESTADO COJEDES

**Tutor Académico: Prof. Mónica Martiz. CoTutor: Prof. Carlo Di Yorio.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. Año 2006, n° pág. 119**

Palabras Claves: Flotación, Óxidos de Hierro, Arenas Silíceas.

Resumen. Esta investigación tiene como finalidad disminuir los contenidos de óxidos de hierro para obtener, mediante procesos de concentración por flotación inversa, un útil de mineral de sílice lo más libre de óxido de hierro contaminante, proveniente del yacimiento de la Arenera El Pozote, Tinaquillo, Estado Cojedes.

A la muestra recibida en el laboratorio, se le hizo estudios de caracterización petrográfica, difracción de Rayos X, análisis químico y granulométrico, con el objetivo de preparar la muestra de alimentación para el proceso de flotación. Los parámetros analizados que intervinieron en éste fueron: dosificación de dos colectores ácidos grasos (FATTY ACID 152, ARR-MAZ) y sulfonato de petróleo (AERO PROMOTER 801R, CYANAMID), ácido sulfúrico (H_2SO_4) como modificador pH, silicato de sodio ($NaSiO_2$) como depresante, espumante (FROTHER 400), r.p.m. tiempo de acondicionamiento, dilución de la pulpa y tiempo de recolección de espumas.

La condición experimental donde se alcanzó mayor porcentaje de Fe_2O_3 fue con la variable dosis del colector (FATTY ACID 152) con 491 gr/ton. y con la variable r.p.m. en su valor mínimo de 1200.

Por medio del proceso de concentración por flotación inversa, se pudo constatar que el útil obtenido, amerita ser pasado por más procesos de flotación, para alcanzar los requerimientos del mercado.

A Dios Todopoderoso le dedico mi Trabajo Especial de Grado;
repítele a mis entrañas *“no temas, estoy contigo”*.
Dios mío, di a mi alma *“Yo soy tu Victoria”*.

A Silvio Luis mi padre; quien en vida me dio siempre un apoyo incondicional, desinteresado,
constante y me condujo por el sendero del saber.
Hoy levanto mi voz para elogiarte porque,
en vez del día, me has dado luz, sol y colores.

A Benita Isolina mi madre; porque junto a ti me siento fuerte y confiado. Sólo el pensar que tengo
una madre como tú, me da ánimo.
Me siento apoyado en tu brazo y guiado por tu mano.
Se acabó el combate desafiante mamá, ya no habrá más llanto, ni sobresaltos... el sol por fin
brillará para ti.

A mis hermanos, Silvia y Luis Alberto; quienes por su perseverancia e insistencia contribuyeron a
que mi sueño se hiciera realidad.

A Ysmery y Silmar mis sobrinas; quienes me brindaron un punto de apoyo para culminar este
trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela; la casa de estudios donde alcancé una de las metas más importantes de mi vida.

Al Departamento de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Facultad de Ingeniería; por haberme permitido la realización de este trabajo.

A la Prof. Mónica Martiz; por su guía, paciencia, perseverancia, comprensión y apoyo para la culminación de este trabajo.

Al Prof. Carlo Di Yorio, por su colaboración incondicional y por darme las bases para el inicio de este trabajo.

A la Prof. Olivia Brito; quien en vida mostró ser siempre, además de excelente profesora, una amiga incondicional.

Al Prof. Jorge Mora; por la invaluable colaboración prestada en el laboratorio de Termo cronología, y al Prof. Ricardo Alezones; por sus sugerencias oportunas.

Al Técnico Marcial Pérez; por su valiosa ayuda prestada a mi persona en las prácticas de laboratorio instrumental.

Al los Técnicos Félix, Elio, Rómulo, Omar y Zapata; por su apoyo en la elaboración de las prácticas.

A mis compañeros Chirinos, Pacheco, Iván, Ricardo, Páez y Leslie; por compartir mis horas de alegría y tristezas, y por darme siempre críticas constructivas, consejos oportunos y aliento para alcanzar esta meta.

A todas las demás personas que de una u otra forma contribuyeron con la materialización de esta meta y por estar allí... a todos, simplemente gracias.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
INDICE GENERAL.....	viii
ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS.....	xxi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
I.1. Generalidades.....	2
I.2. Objetivos.....	2
I.2.1. Objetivo General	2
I.2.2. Objetivos Específicos	2
I.3. Justificación y Alcance del Trabajo	3
I.4. Procedencia de las Muestras	3
I.5. Geología Regional.....	5
I.6. Geología Local.....	11
I.7. Procedimientos de Obtención de las Muestras	11
CAPÍTULO II CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS ARENAS SILÍCEAS	14
II.1. Generalidades.....	14
II.1.1. El Elemento Silicio	15
II.1.2. Los Óxidos	16
II.1.3. Los Silicatos.....	17
II.1.3. El Cuarzo	18
II.1.3. Minerales Industriales o Arenas	20

II.2. Conceptualización de las Arenas Silíceas	21
II.3. Especificaciones y Usos de las Arenas Silíceas.....	21
II.4. Reservas Nacionales	25
II.5. Métodos de Exploración, Explotación y Procesamiento	29
II.5.1. Métodos de Exploración	29
II.6. Mercado Nacional: Producción y Exportación.....	30
CAPÍTULO III. FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA FLOTACIÓN	33
III.1. Fundamentos del Proceso de Concentración por Flotación	33
III.1.1. Conceptualización	33
III.1.2. Importancia de la Flotación	35
III.2. Características de las Fases e Interfases que Intervienen en el Proceso de Flotación	36
III.2.1. Fases	36
III.2.2. Interfases.....	40
III.3. Reactivos de la Flotación.....	47
III.4. Flotación de Óxidos y Silicatos	49
III.5. Acondicionamiento: Efectos del Tamaño de la Partícula	50
III.6. Cinética de la Flotación.....	51
CAPÍTULO IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL	52
IV.1. Preparación Mecánica de la Muestra	52
IV.1.1. Homogeneización y Cuarteo	52
IV.1.2. Atricción o Lavado.....	53
IV.1.3. Corte de Malla y Secado.....	55
IV.2. Caracterización de la Muestra	56
IV.2.1. Difracción de Rayos X	56
IV.2.2. Análisis Granulométrico	59
IV.2.3. Estudios de Liberación	68
IV.2.4. Análisis Químico para la determinación de óxidos de hierro Fe ₂ O ₃	69

IV.3. Diseño Experimental	76
IV.3.1. El Diseño Experimental y sus Aplicaciones.....	76
IV.3.2. El Diseño Factorial 2^k	77
IV.3.3. Metodología	78
IV.4. Concentración por Flotación.....	81
IV.4.1. Equipos	81
IV.4.2. Reactivos	82
IV.4.3. Materiales e Instrumentos.....	83
IV.4.4. Ensayos Exploratorios.....	83
IV.5. Resultados Experimentales	86
IV.6. Discusión de Resultados	95
CONCLUSIONES	111
RECOMENDACIONES	112
BIBLIOGRAFÍA	113
LINKS RECOMENDADOS	118
APÉNDICE	119

ÍNDICE DE CUADROS Y TABLAS

	Pág.
Cuadro 1. Diferencias entre Minerales Metálicos y no Metálicos	15
Tabla 1. Especificaciones de arenas silíceas para la fabricación de vidrio plano (CARR, 1994).....	22
Tabla 2. Tamaño de grano típico y composición química de arenas silíceas para filtrado (CARR, 1994)	24
Tabla 3. Principales Recursos Minerales No Metálicos de Venezuela. 2003. (Millones de T.M.)	28
Tabla 4. Producción de Minerales No Metálicos entre 1998 y el 2003.	30
Tabla 5. Exportaciones de Minerales No Metálicos en Venezuela en todas sus formas, de 1998 al 2003.	31
Tabla 6. Volumen y Valor de las Importaciones de Minerales No Metálicos en Venezuela en todas sus formas, de 1998 al 2003.	32
Tabla 7. Distribución Granulométrica de la Zafra Arena Lavada # 1.....	60
Tabla 8. Distribución Granulométrica de la Zafra Arena Lavada # 2	61
Tabla 9. Distribución Granulométrica de la Zafra P - 40	62
Tabla 10. Distribución Granulométrica de la Zafra Rebose.....	63
Tabla 11. Distribución Granulométrica de la Muestra Arena Lavada # 1.....	64
Tabla 12. Distribución Granulométrica de la Muestra Arena Lavada # 2	65
Tabla 13. Distribución Granulométrica de la Muestra P - 40.....	66
Tabla 14. Distribución Granulométrica de la Muestra Rebose	67
Tabla 15. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) por Absorción Atómica de la Muestra Cabeza	75
Tabla 16. Ordenamiento de las Condiciones Experimentales del Diseño # 1	79
Tabla 17. Ordenamiento de las Condiciones Experimentales del Diseño # 2	80
Tabla 18. Distribución de las Diferentes Combinaciones Experimentales para el Diseño #1	80
Tabla 19. Distribución de las Diferentes Combinaciones Experimentales para el Diseño #2	81

Tabla 20. Condiciones de los Ensayos Exploratorios en Celda Convencional DENVER.....	85
Tabla 21. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) por Absorción Atómica de la Arena Lavada # 1	87
Tabla 22. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) por Absorción Atómica de la Arena Lavada # 2	88
Tabla 23. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) por Absorción Atómica del Material P – 40	89
Tabla 24. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) por Absorción Atómica del Material Rebose	90
Tabla 25. Balance de Masa de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) de la Arena Lavada #1.	91
Tabla 26. Balance de Masa de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) de la Arena Lavada #2.	92
Tabla 27. Balance de Masa de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) del Material P - 40	93
Tabla 28. Balance de Masa de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) del Material Rebose	94
Tabla 29. Efecto del Colector AERO 801 sobre Masa de Fe_2O_3	95
Tabla 30. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe_2O_3	96
Tabla 31. Efecto del Colector FATTY ACID 152 sobre Masa de Fe_2O_3	97
Tabla 32. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe_2O_3	98
Tabla 33. Efecto del Colector AERO 801 sobre Masa de Fe_2O_3	99
Tabla 34. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe_2O_3	100
Tabla 35. Efecto del Colector FATTY ACID 152 sobre Masa de Fe_2O_3	101
Tabla 36. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe_2O_3	102
Tabla 37. Efecto del Colector AERO 801 sobre Masa de Fe_2O_3	103
Tabla 38. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe_2O_3	104
Tabla 39. Efecto del Colector FATTY ACID 152 sobre Masa de Fe_2O_3	105
Tabla 40. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe_2O_3	106
Tabla 41. Efecto del Colector FATTY ACID 152 sobre Masa de Fe_2O_3	107
Tabla 42. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe_2O_3	108
Tabla 43. Efecto del Colector AERO 801 sobre Masa de Fe_2O_3	109
Tabla 44. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe_2O_3	110

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Zafra Arena Lavada # 1	60
Gráfico 2. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Zafra Arena Lavada # 2	61
Gráfico 3. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Zafra P - 40	62
Gráfico 4. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Zafra Rebose	63
Gráfico 5. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Muestra Arena Lavada # 1	64
Gráfico 6. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Muestra Arena Lavada # 2	65
Gráfico 7. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Muestra P - 40	66
Gráfico 8. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Muestra Rebose	67
Gráfico 9. Dosis del Colector AERO 801R vs. Masa de Fe_2O_3	95
Gráfico 10. Gráfico r.p.m. Vs Masa de Fe_2O_3	96
Gráfico 11. Gráfico Dosis del Colector FATTY ACID 152, Vs Masa de Fe_2O_3	97
Gráfico 12. Gráfico r.p.m. Vs Masa de Fe_2O_3	98
Gráfico 13. Dosis del Colector AERO 801R, Vs Masa de Fe_2O_3	99
Gráfico 14. r.p.m. Vs Masa de Fe_2O_3	100
Gráfico 15. Dosis del Colector FATTY ACID 152, Vs Masa de Fe_2O_3	101
Gráfico 16. r.p.m. Vs Masa de Fe_2O_3	102
Gráfico 17. Dosis del Colector AERO 801R, Vs Masa de Fe_2O_3	103
Gráfico 18. r.p.m. Vs Masa de Fe_2O_3	104
Gráfico 19. Dosis del Colector FATTY ACID 152 Vs Masa de Fe_2O_3	105
Gráfico 20. r.p.m. Vs Masa de Fe_2O_3	106
Gráfico 21. Dosis del Colector AERO 801R, Vs Masa de Fe_2O_3	107
Gráfico 22. r.p.m. Vs Masa de Fe_2O_3	108
Gráfico 23. Dosis del Colector FATTY ACID 152, Vs Masa de Fe_2O_3	109
Gráfico 24. r.p.m. Vs Masa de Fe_2O_3	110

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1. Ubicación relativa nacional del yacimiento “Arenera El Pozote” que está localizado en Los Cerritos, Tinaquillo, Edo. Cojedes, Venezuela.	4
Fig. 2. Esquema geológico del Macizo de Tinaco-Tinaquillo; según los mapas detallados de MacKENZIE (1960), MENÉNDEZ (1965), OXBURGH (1965) et JARVIS (1965).....	5
Fig. 3. Faja de la Cordillera de la Costa.....	6
Fig. 4. Faja de Caucagua – El Tinaco. Peridotito de Tinaquillo.....	7
Fig. 5. Faja de Paracotos	9
Fig. 6. Faja de Villa de Cura	10
Fig. 7. Procedimiento de obtención de la muestra Arena Lavada #1 y su Rebose	12
Fig. 8. Procedimiento de obtención de la muestra Arena Lavada # 2 y su Rebose	13
Fig. 9. Procedimiento de obtención de la muestra P- 40	13
Fig. 10. Ubicación de las Principales Reservas Nacionales de Arenas Silíceas	25
Fig. 11. Doble Capa Eléctrica o Capa de Stern.....	43
Fig. 12. Cuarteador Jones preparando a la muestra P-40 para la Atricción.	53
Fig. 13. Pulpa en el Tanque de Lavado de la Máquina de Atricción.....	54
Fig. 14. Lavado	54
Fig. 15. Producto de la Atricción	55
Fig. 16. Equipo de Separación Magnética.....	57
Fig. 17. Difractómetro	58
Fig. 18. Espectrofotómetro de Absorción Atómica.....	69
Fig. 19. Lámpara de Cátodo Hueco	71
Fig. 20. Fundición en Horno de las Muestras en el Proceso de Análisis Químico.	73
Fig. 21. Agitación de las Muestras Hasta Disolver la Perla.....	74
Fig. 22. Celda Convencional Aislada Denver	82
Fig. 23. Proceso de Recolección de la Espuma.....	84

INTRODUCCIÓN

En Venezuela existen yacimientos minerales de baja ley, que por el método de concentración por flotación, se pueden convertir en menas rentables. Actualmente se explotan estos yacimientos complejos considerados no rentables, dada la efectividad y bajos costos de este método tan versátil.

La flotación aplicada a la concentración de minerales es utilizada en coordinación con otras operaciones de ingeniería de minerales, tales como la preparación mecánica del mineral, (homogeneización, atricción o lavado, clasificación dimensional) y la caracterización de la muestra (caracterización petrográfica, difracción de rayos X, análisis químico y granulométrico), las cuales se requieren para adecuar la alimentación a tratar por la operación de flotación.

Las arenas silíceas objeto de esta investigación, procedentes de la Arenera El Pozote, Tinaquillo, Estado Cojedes; contienen un porcentaje de impurezas de óxidos de hierro que deben disminuirse a través del método de concentración por flotación, mediante la absorción de reactivos químicos colectores. Estos reactivos son decisivos porque son moléculas o iones de sustancias orgánicas, que al absorberse selectivamente sobre las superficies minerales, las convierten en hidrofóbicas adhiriéndose a una burbuja de aire, y se produce una espuma mineralizada de óxidos de hierro separada de la arena silícea, la cual puede optimizarse hasta obtener un material con las características específicas para su utilización en diferentes industrias: fabricación del vidrio, purificación de agua para piscinas, agregado para concreto, entre otras.

CAPÍTULO I

I.1. Generalidades

La mena de las arenas silíceas “Arenera El Pozote” se encuentra en la ciudad de Tinaquillo, Estado Cojedes; y presenta un porcentaje de impurezas de óxido de hierro que la hacen inadecuada como material para la fabricación del vidrio y/u otros productos. Mediante el proceso de concentración por flotación se podrá determinar el grado de optimización, que por medio de los colectores ácidos grasos (Fatty Ácid 152, ARR-MAZ) y sulfonato de petróleo (Aero Promoter 801R, CYANAMID), disminuirán la presencia de esos óxidos de hierro.

I.2. Objetivos

I.2.1. Objetivo General

Disminuir las impurezas de los óxidos de hierro contenidos en las muestras de arenas silíceas obtenidas en la Arenera El Pozote, Tinaquillo, Estado Cojedes, mediante el proceso de concentración por flotación inversa, con el fin de beneficiar la sílice y sea apta como materia prima para fabricar vidrio y/u otros productos.

I.2.2. Objetivos Específicos

- Realizar estudios de caracterización de la mena a tratar (petrográfica, difracción de rayos X, análisis químico y granulométrico) para preparar la muestra de alimentación del proceso de concentración por flotación.
- Preparar la muestra mediante procesos mecánicos de cuarteo, clasificación dimensional, atricción o lavado y corte de malla granulométrica, con el objetivo de disminuir las lamas que perturban el proceso de flotación.

- Determinar los parámetros del proceso de flotación inversa a utilizar para esta mena que permitan obtener espumas mineralizadas de óxidos de hierro separadas de la sílice; con el fin de optimizarla para su uso industrial.
- Analizar, evaluar y discutir los resultados obtenidos en los ensayos del proceso de concentración por flotación.

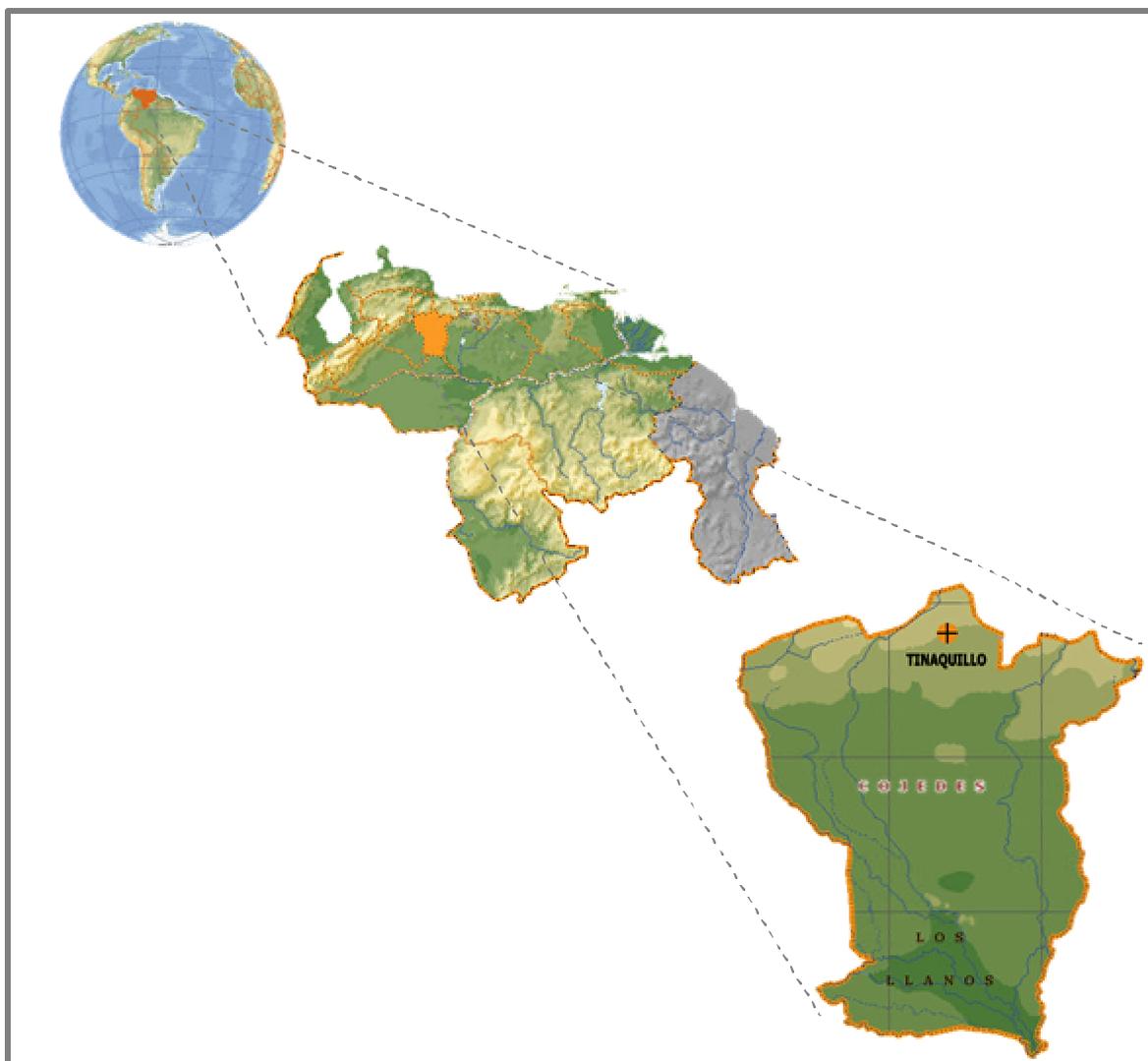
I.3. Justificación y Alcance del Trabajo

Al llevar a cabo la concentración por flotación inversa utilizando los reactivos colectores ácidos grasos (Fatty Ácid 152, ARR-MAZ) y sulfonato de petróleo (Aero Promoter 801, CYANAMID), se obtendrán espumas mineralizadas de óxidos de hierro, las cuales permitirán una muestra de arena de primera calidad cuya composición debe alcanzar un 99% de sílice con un máximo permitido de 0,020 % de óxido de hierro; obteniendo así un producto más refinado para su utilización en diferentes industrias. He aquí la importancia de este estudio.

I.4. Procedencia de las Muestras

Las muestras de arenas silíceas utilizadas en los ensayos de concentración por flotación provienen del yacimiento de minerales industriales “Arenera El Pozote”, propiedad de la empresa Sílica C.A., el cual se encuentra ubicado en la zona de Los Cerritos, en la ciudad de Tinaquillo, Distrito Falcón del Estado Cojedes (Ver Figura 1). Geográficamente está situado entre los 68°14' y 68°20' de Longitud Oeste, y los 9°53' y 10°10' de Latitud Norte (N 1.103.500 – N 1.102.000) y (E 579.950 – E 578.700)

Fig. 1. Ubicación relativa nacional del yacimiento “Arenera El Pozote” que está localizado en Los Cerritos, Tinaquillo, Edo. Cojedes, Venezuela.

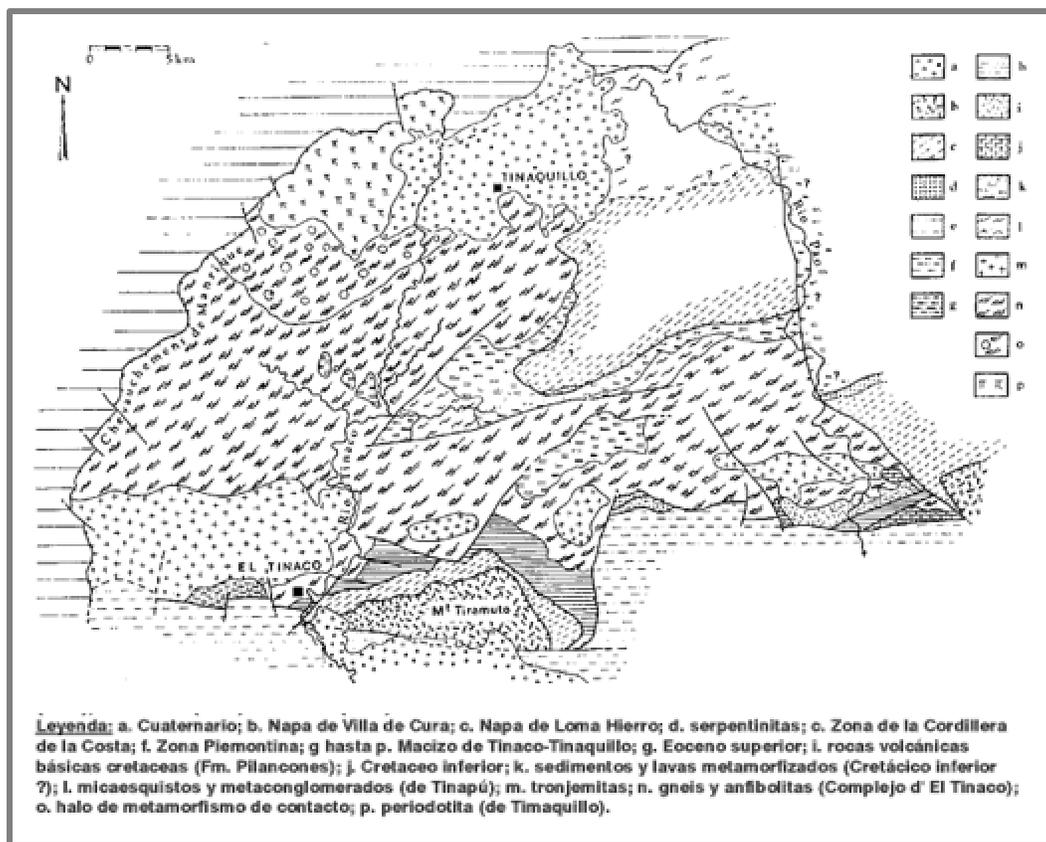


FUENTE: Elaboración propia compuesta con imágenes tomadas de la Enciclopedia ©Microsoft Encarta 2004.

I.5. Geología Regional

En la parte norte del Estado Cojedes, específicamente en el macizo Tinaco-Tinaquillo, afloran rocas ígneas, metamórficas y metasedimentarias pertenecientes al Mesozoico (Ver Fig.2).

Fig. 2. Esquema geológico del Macizo de Tinaco-Tinaquillo; según los mapas detallados de MacKENZIE (1960), MENÉNDEZ (1965), OXBURGH (1965) et JARVIS (1965).



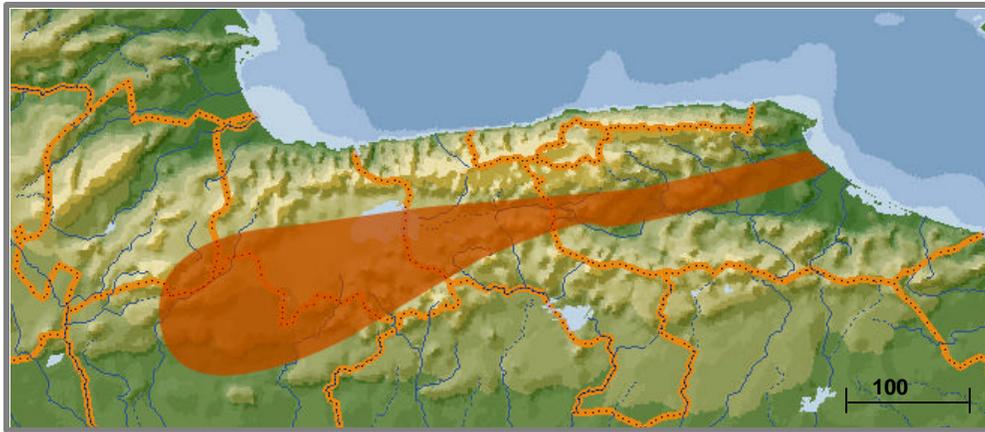
FUENTE: Mapa tomado de González de Juana et al. (1980, p.324)

El sistema orográfico de las montañas occidentales del Caribe o Macizo Central fue subdividida por Menéndez (1966) en cuatro fajas tectónicas orientadas en sentido Este-Oeste, las cuales tienen características estructurales propias. Las mismas se denominan “Faja de la Cordillera de la Costa”, “Faja de Caucagua-El Tinaco”, “Faja de Paracotos” y “Faja de Villa de Cura”.

A. Faja de la Cordillera de la Costa

Pertenciente a la Formación Las Mercedes, la Faja de la Cordillera de la Costa (Ver Fig. 3) está ubicada en la parte septentrional del sistema montañoso del Caribe, entre los flancos del macizo central de la Cordillera; desde el Edo. Miranda (Carenero), hasta el Edo. Cojedes. Limita al sur, en gran parte, con una zona de fallas de la Victoria, la cual lo separa de la Faja Caucagua-El Tinaco (González de Juana).

Fig. 3. Faja de la Cordillera de la Costa



FUENTE: Elaboración propia compuesta con imágenes tomadas de la Enciclopedia ©Microsoft Encarta 2004.

Dentro de la faja afloran rocas de una cobertura volcánico sedimentaria metamorfozada del Jurásico Superior - Cretáceo Inferior, pertenecientes al Grupo Caracas; metasedimentarias cretácicas en el tope, que constituyen el Grupo Post Caracas, y un núcleo gnésico-granítico de grandes pliegues que descansan sobre un basamento ígneo metamórfico denominado "Complejo de Sebastopol" de edad Precámbrica - Paleozoica, el cual está expuesto en los núcleos de grandes pliegues abiertos (Ostos, 1985).

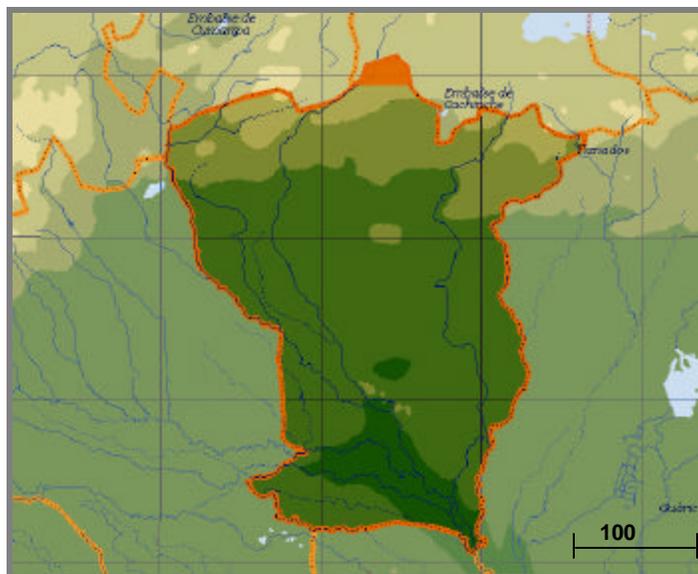
González de Juana (1980) manifiesta que la litología predominante consiste en esquistos cuarzo - moscovítico - calcítico - grafitoso, con intercalaciones de

mármol grafitoso en forma de lentes, que cuando alcanza gruesos espesores se denomina “Caliza de Los Colorados”. Las rocas presentan buena foliación y grano de fino a medio, el color característico es el gris parduzco. La mineralogía promedio consiste en cuarzo (40%) en cristales dispuestos en bandas con la mica, muscovítica (20%) en bandas lepidoblásticas a veces con clivaje granuloso, calcita (23%) en cristales con maclas polisintéticas, grafito (5%) y cantidades menores de clorita, óxidos de hierro, epidoto y ocasionalmente plagiocasa sódica.

B. Faja de Caucahua - El Tinaco

La unidad está constituida por un sólo cuerpo con dimensiones de 13 por 7 Km., expuesta al noroeste de Tinaquillo, sector norcentral del estado Cojedes. Se extiende desde el límite norte, en el contacto tengencial ubicado al sur de la falla de La Victoria con la Cordillera de la Costa; hasta El Tinaco en el Edo. Cojedes (Ver.Fig.4).

Fig. 4. Faja de Caucahua – El Tinaco. Peridotito de Tinaquillo.



FUENTE: Elaboración propia compuesta con imágenes tomadas de la Enciclopedia ©Microsoft Encarta 2004.

Al sur, por la Falla de Santa Rosa, aflora de forma discontinua en un basamento paleozoico de composición granítica suprayacente a una secuencia volcánica sedimentaria, conformada por rocas alóctonas del Eoceno Tardío. Esta faja es una masa ultramáfica de forma tabular de unos 3 Km. de espesor (Mackenzie, 1966) compuesta, de abajo hacia arriba, en la siguiente forma:

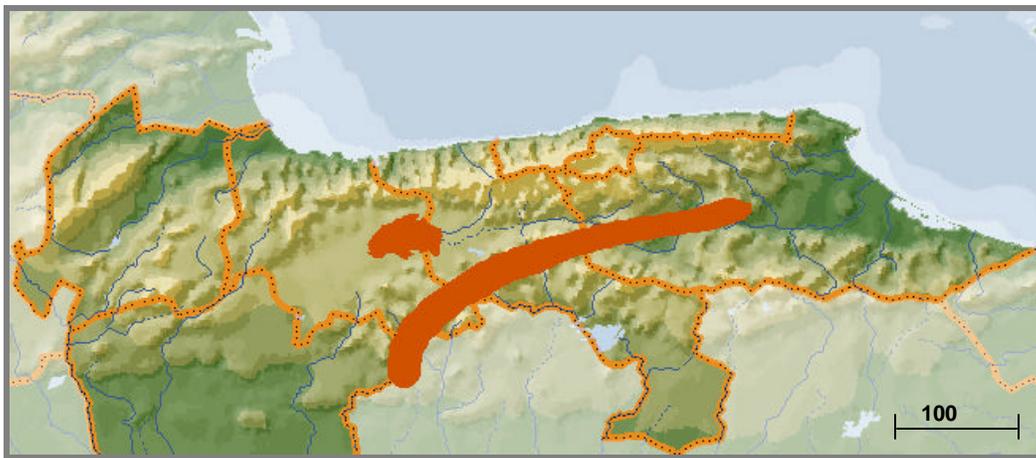
- Una serie de espesa de cuarcitas albíticas, micaesquistos anfibolitas, atribuidas al gneis de la Aguadita.
- Una serie de esquistos y cuarzo-filitas, esquistos cloríticos. Considerándose como homólogos de los Esquistos de Tinapú de Menéndez (1965).
- Una serie de filitas, filitas calcáreas, mármoles y calizas cristalínicas.
- Una secuencia no metamorfizada de lutitas, calizas arenosas y calizas conglomeráticas bioclásticas con material lítico, proveniente de diferentes series infrayacentes; incluyendo la formación Tucutunemo.

De acuerdo a Mackenzie (1960) este cuerpo tiene una edad Cretácica y en él se diferencian varios tipos de rocas, como son peridotita no serpentizada y serpentizada, las cuales constituyen el 95% de la zona de afloramientos. El 5% restante está constituido por capas delgadas de piroxenita, anfibolita y metagabro, aunque por lo general escasean en las partes meridional y suroccidental y abundan en el extremo nororiental de la peridotita. Adicionalmente, Ostos (1990, p. 61-62) indica que la unidad puede tener una edad Paleozoica tardía y está caracterizada por la presencia de harzburgita (75%), dunita (20%), serpentinita (5%), metagabro (10%) y piroxenita; presenta foliación milonítica y una lineación mineral bien desarrollada.

C. Faja de Paracotos

Ubicada entre las Fajas Caucagua - El Tinaco y Villa de Cura, esta unidad constituye la Faja de Paracotos de Menéndez (1966) y Bell (1968), siendo interpretada en forma diferente por Beck (1985 - 1986), quien la considera como parte de su Napa de Loma de Hierro. La formación se extiende a través de los estados Cojedes, Carabobo, Guárico, Aragua y Miranda; y según Menéndez (1966), está limitada parcialmente el norte y al sur por las fallas de Santa Rosa y Agua Fría, respectivamente (González de Juana et al, 1980) (Ver Fig. 5).

Fig. 5. Faja de Paracotos



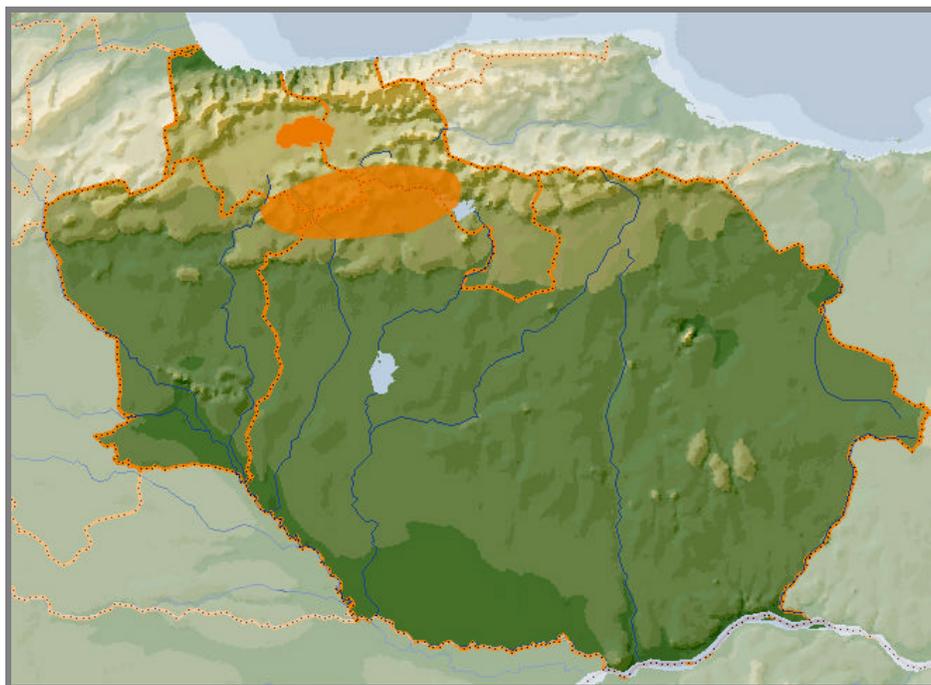
FUENTE: Elaboración propia compuesta con imágenes tomadas de la Enciclopedia ©Microsoft Encarta 2004.

La Formación Paracotos es descrita como una mezcla de litologías diversas no relacionadas genéticamente. La edad para ésta faja se ha inferido como del Paleoceno, y estructuralmente presenta una foliación constante y paralela al corrimiento de Agua Fría (González de Juana et al. 1980). En ella se describen metaarenisca, metapelita y mármol; todas estas rocas con efectos metamórficos de muy bajo grado.

D. Faja de Villa de Cura

Aguerrevere y Zuloaga (1937) introdujeron el nombre Serie de Villa de Cura para designar una asociación compleja de rocas mayoritariamente metavolcánicas expuestas en las cercanías de Villa de Cura, estado Aragua. Posteriormente, los mismos autores (1938) la formalizan como Grupo, integrado por sus Formaciones Charallave y Villa de Cura. Shagam (1960) redefine al Grupo Villa de Cura, dividiéndolo en cinco formaciones: El Caño, El Chino, El Carmen, Santa Isabel y Las Hermanas. De acuerdo al mapa geológico compilado por Bellizzia (1976), se observa que se extiende como un bloque continuo por más de 250 Km. de longitud con un ancho medio de unos 25 Km., abarcando parte de los estados Cojedes, Guárico, Carabobo, Aragua y Miranda (Ver Fig. 6). El grupo está compuesto de rocas del Jurásico – Cretácico, del tipo metavolcánicas y metasedimentarias de granulometría variable.

Fig. 6. Faja de Villa de Cura



FUENTE Elaboración propia compuesta con imágenes tomadas de la Enciclopedia ©Microsoft Encarta 2004.

I.6. Geología Local

La superficie estudiada presenta una extensa zona de terrazas esencialmente aluvionales de edad Cuaternaria que se extienden a lo largo del frente de montaña, desde la quebrada Las Astas hasta Taguanes. Las terrazas localizadas y estudiadas tipifican secuencias de abanicos aluvionales cercanos a la planicie de sedimento, en donde los intervalos se caracterizan por una serie de estructuras sedimentarias de poca energía y escasas en material de gran volumen. Observaciones directas indican que estos depósitos poseen un espesor por encima a los 30 m y presentan niveles de gravilla en forma continua, con material intercalado de limos arenosos amarillentos con arenas de grano fino. La matriz está formada por cuarzo de grano fino, minerales arcillosos, poco feldespato y minerales de hierro. Su aspecto general es el de pequeñas colinas redondeadas de pocos centenares de metros de anchura, cuyas cimas forman una superficie uniforme de 30 a 60 m de altura sobre los cauces de las quebradas.

I.7. Procedimientos de Obtención de las Muestras

Al Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas del Departamento de Minas de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, llegaron cuatro muestras de arenas representativas de la mena "Arenera El Pozote", propiedad de la empresa Silíca C.A., denominadas:

- Arena lavada # 1
- Arena lavada # 2
- Pasante de la malla 40 (P - 40)
- Polvillo o Rebose

Estas muestras se obtuvieron de los siguientes procesos:

- A. La arena lavada # 1, proviene de un tornillo lavador N° 1 (Ver Fig.7).
- B. La arena lavada # 2, es del género saliente del tornillo lavador N° 1, que alimenta al tornillo lavador N° 2 (Ver Fig. 8)
- C. El origen del material P – 40, está representado en la Figura 9.
- D. El polvillo, es el resultado de un rebose del proceso de lavado de los tornillos lavadores 1 y 2 (Ver Fig. 7 y 8).

Fig. 7. Procedimiento de obtención de la muestra Arena Lavada #1 y su Rebose

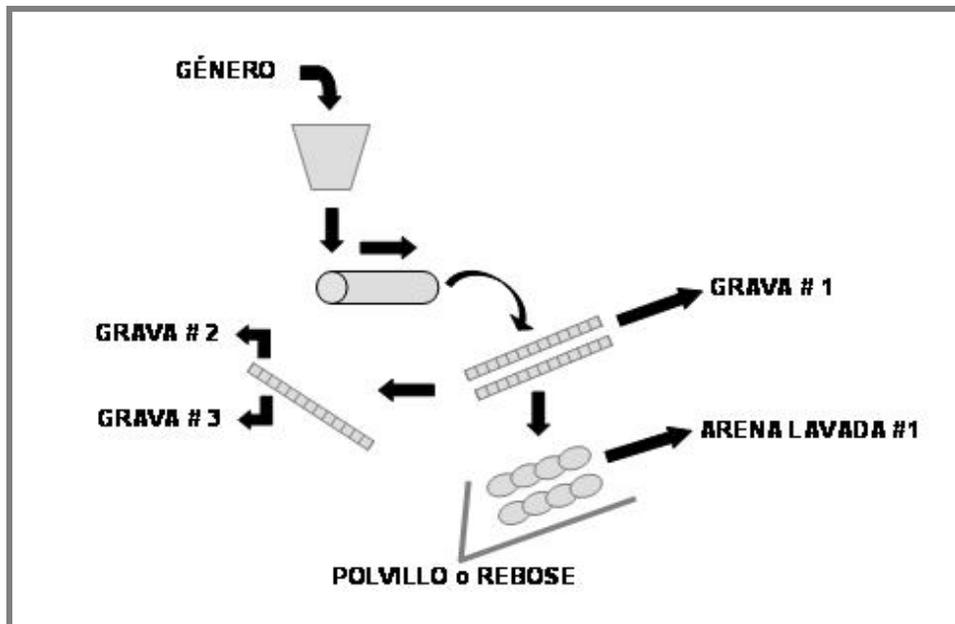


Fig. 8. Procedimiento de obtención de la muestra Arena Lavada # 2 y su Rebose

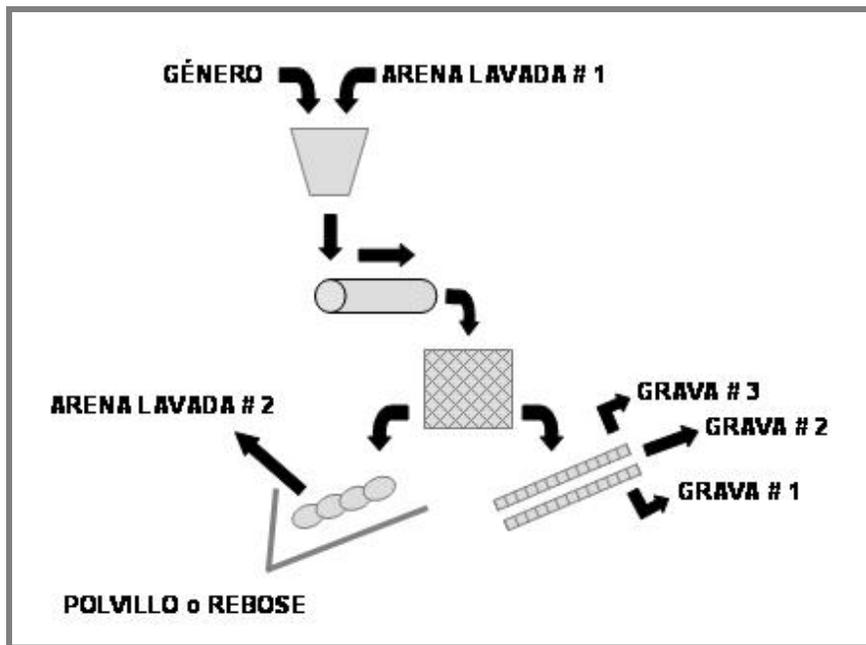
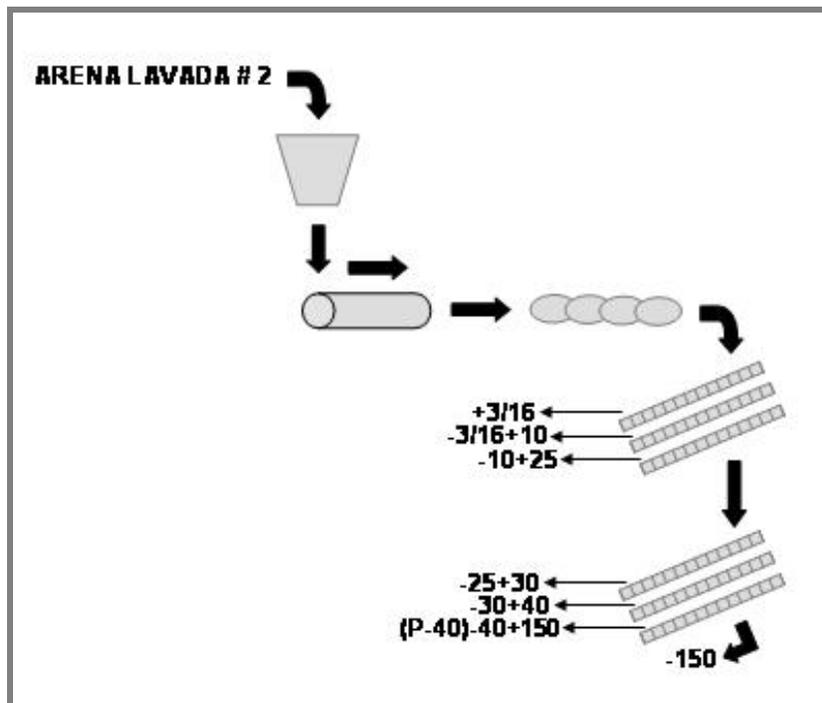


Fig. 9. Procedimiento de obtención de la muestra P- 40



CAPÍTULO II CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS ARENAS SILÍCEAS

II.1 . Generalidades

La mineralogía es propia de las ciencias geológicas que estudian la corteza terrestre; literalmente significa “ciencia de los minerales”. Como ciencia de las combinaciones químicas naturales, estudia la composición, estructura, propiedades, condiciones de génesis e importancia práctica de los minerales.

El término mineral procede del latín “minera”, éste término comprueba la aparición al desarrollo de la minería. Se denominan minerales a los componentes de las rocas y menas que se distinguen por su composición química y propiedades físicas (brillo, color, dureza, huella, etc.). Font-Altaba, M (s. f.) citado en Atlas de Mineralogía define al mineral como *“los seres naturales de composición química definida y de estructura cristalina determinada, que a veces se presenta en formas geométricas más o menos regulares”*. Betejtin, A (1977), en su obra Curso de Mineralogía, conceptualiza al mineral como *“componente de las rocas y menas, que se distinguen por su composición química y propiedades físicas (brillo, color, dureza, maleabilidad, etc.)”*. Font-Altaba también indica que *“Todo mineral debe reunir tres cualidades: unidad material, origen natural y pertenecer a la parte sólida de la corteza terrestre. La materia de que constan los minerales está formada por la ordenación sistemática de las partículas elementales que constituyen átomos, iones o moléculas, dando origen a un medio periódicamente homogéneo denominado materia cristalina que si tiene forma poliédrica forma un cristal”*. Se pueden establecer diferencias entre los minerales clasificándolos entre Metálicos y No Metálicos (Ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Diferencias entre Minerales Metálicos y no Metálicos

ATRIBUTOS	MINERALES METÁLICOS	MINERALES NO METÁLICOS
VALOR COMERCIAL	Menor	Mayor
PROCESO	Complejo	Simple
IMPORTANCIA	Depende del tenor	Depende de sus propiedades físicas
ÚTIL	10%;= 1%	Se vende todo
COMERCIALIZACIÓN	A niveles pequeños	A gran escala

FUENTE: Elaboración propia.

Aunque el grupo específico de minerales relacionado con este trabajo es el de los minerales no metálicos, al cual pertenecen las arenas silíceas; no podemos descartar al grupo de los metálicos, pues ningún mineral no metálico se encuentra en estado puro o alotrópico, es decir, su estado natural es encontrarse combinado¹. Por ejemplo, un grano de arena como roca consta de varios minerales de distinta composición, por lo general sílice, feldespatos, cuarzos y minerales de óxidos de hierro.

II.1.1. El Elemento Silicio

Silicio, de símbolo *Si*, es un elemento semimetálico, el segundo elemento más común en la Tierra después del oxígeno. Su número atómico es 14 y pertenece al grupo 14² de la tabla periódica. Fue aislado por primera vez de sus compuestos en 1823 por el químico sueco Jöns Jakob Berzelius. El silicio

¹ En el grupo de los minerales metálicos es el único donde podemos encontrar naturalmente algunos elementos en estado alotrópico.

² Los grupos o columnas verticales de la tabla periódica fueron clasificados tradicionalmente de izquierda a derecha utilizando números romanos seguidos de las letras "A" o "B", en donde la "B" se refiere a los elementos de transición. En la actualidad ha ganado popularidad otro sistema de clasificación, que ha sido adoptado por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, siglas en inglés). Este nuevo sistema enumera los grupos consecutivamente del 1 al 18 a través de la tabla periódica.

cristalino tiene una dureza de 7, suficiente para rayar el vidrio, de dureza de 5 a 7. El silicio tiene un punto de fusión de 1.410°C, un punto de ebullición de 2.355°C y una densidad relativa de 2,33. Su masa atómica es 28,086.

El silicio constituye un 28% de la corteza terrestre. No existe en estado libre, sino que se encuentra en forma de óxido (dióxido de silicio SiO_2) y de silicatos complejos. El mineral cuarzo, sus variedades (cornalina, crisoprasa, ónice, pedernal y jaspe) y los minerales cristobalita y tridimita son las formas cristalinas del silicio existentes en la naturaleza.

Los minerales que contienen silicio constituyen cerca del 40% de todos los minerales comunes, incluyendo más del 90% de los minerales que forman rocas volcánicas.

II.1.2. Los Óxidos

Los óxidos son un grupo de minerales duros, densos y refractarios que generalmente se presentan de forma accesoria en las rocas ígneas y en las metamórficas o como granos detríticos residentes en los sedimentos, predominando por doquier en la corteza terrestre. Proviene de un proceso de reacción química al combinarse el oxígeno con uno o más metales o metaloides. Además de simples (compuestos de un metal y oxígeno, Ej. Fe_2O_3) o múltiples (tienen dos posiciones con átomos metálicos no equivalentes, Ej. FeTiO_3), se clasifican en dos clases:

- Óxidos anhidros
- Óxidos o hidróxidos que contienen iones de hidroxilo e hidrógeno.

El total de óxidos libres en la litosfera³, expresado en peso, llega a cerca del 17%, del cual un 12,6% son silicatos; 3,9% lo constituyen los óxidos e hidróxidos de hierro, y el porcentaje restante está compuesto por óxidos e hidróxidos de aluminio, manganeso, titanio y cromo, entre otros. Muchos de estos minerales son de gran importancia económica. El dióxido de silicio (SiO₂) o sílice es el constituyente principal de la arena y las rocas silíceas. Una de las variedades polimorfas del SiO₂, el cuarzo, es el más corriente de todos los óxidos; pero por su estructura guarda mucha más relación con el grupo de los silicatos.

II.1.3. Los Silicatos

Son los componentes más importantes de las rocas y constituyen, con el cuarzo, el 95% de la parte conocida de la corteza terrestre, pues son los componentes principales (en concreto los de aluminio, calcio y magnesio) de las arcillas, el suelo y las rocas, en forma de feldespatos, anfíboles, piroxenos, micas y ceolitas, y de piedras semipreciosas como el olivino, granate, zircón, topacio y turmalina. Es la clase más rica en especies y debido a la facilidad de su investigación óptica, es una de las mejor conocidas. Físicamente se reconocen con facilidad por su falta de color propio, brillo no metálico, raya blanca, elevada dureza y su aspecto general bastante característico.

La mayoría de los silicatos los encontramos como constituyentes de las rocas eruptivas, formados a temperaturas y presiones elevadas, generalmente en amplia zona de variación de ambas variables, con estructuras densas y carentes de agua. El cuarzo, los feldespatos y las micas, elementos fundamentales del granito, son ejemplos claros de lo anterior. En las condiciones de formación de las rocas metamórficas se originan una serie de

³ Exceptuando la hidrosfera y la atmósfera; donde encontramos el agua en la primera, y el anhídrido carbónico y los vapores de agua, en la segunda.

silicatos, algunos de ellos con estructuras menos densas y con hidroxilos, como las serpentinas, talco, etc.

Estos minerales se conforman esencialmente por grupos tetraédricos SiO_4 que están unidos entre sí directamente, o bien, por medio de cationes. La disposición de los grupos SiO_4 pueden referirse a cinco esquemas generales:

- Neosilicatos: Están individualmente dispuestos en la estructura, unidos entre sí únicamente a través de cationes. Ejemplo: El Circón (SiO_4Zr)
- Sorosilicatos: Se unen dos, tres cuatro o seis SiO_4 por los vértices, dando los tres últimos anillos cerrados. Estos complejos de tetraedros forman unidades individuales enlazadas entre sí únicamente por cationes. Ejemplo: El Berilo $\text{Si}_6\text{O}_{18}\text{Al}_2\text{B}_3$.
- Inosilicatos: Se unen dando cadenas sencillas o dobles que corren a lo largo de todo el mineral, unidas unas con otras únicamente por cationes. Ejemplo: los piroxenos y los anfíboles.
- Filosilicatos: Al unirse por medio de cationes tres vértices de cada tetraedro con los vértices de los vecinos se forma una capa de SiO_4 que queda fuertemente enlazada formando un estrato. Ejemplo: la mica.
- Tectosilicatos: Se unen entre sí formando una armazón tridimensional, que puede o no tener valencias libres. Ejemplo: El cuarzo es una estructura de este tipo sin valencias libres, mientras que los feldespatos tienen cargas repartidas en su estructura debido a sustituciones del Si por Al en algunos tetraedros.

II.1.3. El Cuarzo

Cuarzo, el mineral más común, compuesto por dióxido de silicio o sílice (SiO_2). Distribuido por todo el mundo como componente de rocas o en forma de depósitos puros, es el sedimento más común de las rocas areniscas y de

las arenas silíceas, y también es uno de los mayores constituyentes de algunas rocas ígneas (como el granito, la riolita y la pegmatita, que contienen un exceso de sílice) y metamórficas (el gneis, el esquisto y la cuarcita, que se compone casi en su totalidad de cuarzo).

El Grupo de Cuarzo SiO_2 son cristales enantiomórficos romboédricos de conformación variada según el tipo de yacimiento. El cuarzo común se presenta en cristales de hábito prismático hexagonal, con dos romboedros de igual desarrollo que semejan una bipirámide hexagonal.

La mayoría de los cristales de cuarzo son maclas de complemento de sutura sutura irregular y compenetración íntima, de modo que parecen cristales sencillos y sólo se reconocen por las caras de trapezoides o por medios físicos (piezoeléctrico, actividad óptica, etc.). Los cristales se unen en estas maclas, según cuatro leyes importantes:

- Ley del Delfinado; la macla tiene actividad óptica y se presenta en los cuarzos alpinos (Suiza).
- Ley del Brazil; el conjunto tiene centro de simetría y no tiene actividad óptica. La macla típica del cuarzo amatista que se encuentra en el Brazil, cuyos ejemplares son muy apreciados en joyerías.
- En algunos cristales existen simultáneamente las dos leyes anteriores.
- Ley del Japón o de la Gardeta; se presenta con frecuencia en los cuadros japoneses.

II.1.3. Minerales Industriales o Arenas

La arena es una masa desagregada e incoherente de materias minerales en estado granular fino (que consta normalmente de cuarzo con una pequeña proporción de mica, feldespato, magnetita y otros minerales resistentes), producto de la desintegración química y mecánica de las rocas bajo meteorización y abrasión. Cuando las partículas acaban de formarse suelen ser angulosas y puntiagudas, haciéndose más pequeñas y redondeadas por la fricción provocada por el viento y el agua.

La arena es un constituyente importante de muchos suelos y es muy abundante como depósito superficial a lo largo de los cursos de muchos ríos, en las orillas de lagos, en las costas y en las regiones áridas. Un tipo particular de arena es el ingrediente principal en la fabricación de vidrio, la arena silícea. Otras clases se utilizan en fundición para hacer moldes o para fabricar cerámicas, yesos y cementos. La arena se usa como abrasivo moledor y pulidor bajo la forma de papel de lija, hoja de papel con una de sus caras cubierta de arena o de una sustancia abrasiva similar. La utilización de chorros de arena, impulsados por aire o vapor a presión, es una técnica importante en la limpieza de la piedra o en el pulido de superficies metálicas rugosas. La mayoría de las arenas industriales tienen su denominación de acuerdo a sus usos específicos como: tipo vidrio, fundición, abrasivo, llenado, o arenas de fracturación hidráulica.

La diferencia entre las arenas y la arenisca está basado en el grado de cementación: las arenas se caracterizan por ser el material suelto o muy poco consolidado, mientras que la arenisca comprende la roca consolidada con granulado grueso formado por masas consolidadas de arena. Su composición química es la misma que la de la arena; así, la roca está compuesta en esencia de cuarzo.

II.2. Conceptualización de las Arenas Silíceas

La arena industrial o arena silícea es un término de carácter industrial utilizado para arenas que tienen un alto porcentaje de dióxido de silicio (SiO_2), material esencial para la manufactura de vidrios, fundición de materiales ferrosos y no ferrosos, procesos químicos y metalúrgicos, fracturación hidráulica de depósitos de petróleo, gas y otros productos manufacturados. La definición de la arena silícea viene dada por la industria y por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (S.A.P.M) que la cataloga como partículas de arena granular que pasan a través de una malla N° 4 (0,187 pulgadas). Otra definición pertenece al Estándar de Estados Unidos que corresponde a una malla N° 200 (0,0029 pulgadas) que es resultado de una desintegración natural de rocas más o menos cementadas.

II.3. Especificaciones y Usos de las Arenas Silíceas

Las arenas silíceas tienen una diversidad de usos en una gran cantidad de industrias, siendo las más importantes la del vidrio y la fundición. Otros usos incluyen las industrias metalúrgicas, abrasivos, filtración y la fracturación de formaciones de rocas para mejorar la recuperación de petróleo en los yacimientos.

La arena para fabricación de vidrios es utilizada como materia prima en la manufactura de envases de vidrio, láminas de vidrio, vidrios de seguridad, vidrios de flotación, fibras de vidrio y una amplia variedad de vidrios especiales que incluyen vidrios ópticos y vidrios industriales. Estas arenas deben reunir especificaciones más o menos rígidas con respecto a la pureza y al contenido de sílice, dependiendo del tipo de vidrio que se va a manufacturar. Sólo un pequeño contenido de óxido de hierro y componentes de cromo pueden ser tolerados, y un alto porcentaje de alúmina, calcio u óxido de magnesio son indeseables. Por

ejemplo, para la industria óptica, la arena silíceas considerada de primera calidad debe contener un 99,89% de óxido de sílice, un máximo de 0,10% de alúmina y un 0,02% de óxido de hierro. La mayoría de los fabricantes de vidrio han establecido sus propias especificaciones de acuerdo a las características físicas y a la pureza química de las materias primas que deben acatar los suplidores de arenas silíceas. En los últimos diez años, los fabricantes de cristales y vidrio han mostrado un inusitado interés por las calidades de arenas silíceas finas, debido a que el procesamiento de arenas de grano fino requiere consumo de energía. Mediante la Tabla 1 se verifican las especificaciones típicas para arena silíceas usada en la fabricación de vidrios planos y envases de vidrio.

Tabla 1. Especificaciones de arenas silíceas para la fabricación de vidrio plano (CARR, 1994).

ESPECIFICACIONES QUIMICAS	
SiO ₂	99,5 % min.
Fe ₂ O ₃	0,04 % max.
Al ₂ O ₃	0,30 % max.
TiO ₂	0,1 % max.
Cr ₂ O ₃	2 ppm max.
CO ₃ O ₄	2 ppm max.
MnO ₂	0,002 ppm max.
H ₂ O	0,05 % max.
ESPECIFICACIONES FÍSICAS	
Tamaño (mm)	% Retenido acumulado
1,18	0,0
0,85	0,01 max.
0,425	0,10 max.
0,106	92,0 min.
0,075	99,5 min.

Las especificaciones químicas que se encuentran en la tabla se utilizan para comparar los resultados de los diferentes análisis químicos antes y después de

la flotación; mientras que las especificaciones físicas son utilizadas para la granulometría. El vidrio se fabrica en un reactor de fusión, en donde se calienta una mezcla que casi siempre consiste en arena silíceas (arcillas) y óxidos metálicos secos pulverizados o granulados. En el proceso de la fusión (paso de sólido a líquido) se forma un líquido viscoso y la masa se hace transparente y homogénea a una temperatura mayor a los 1000 °C. Al sacarlo del reactor, el vidrio adquiere una rigidez que permite darle forma y manipularlo. Controlando la temperatura de enfriamiento se evita la desvitrificación o cristalización.

Las arenas silíceas de fundición se utilizan para producir núcleos y moldes o para fundir metales como acero, hierro gris, hierro dulce y bases de aleación de cobre y aluminio. La mayoría de los metales son fundidos en “arena verde”, la cual es una mezcla de sílice y arcilla; también se utiliza mucho en la industria petrolera. Se utiliza también como agente refractario en la fundición de metales, permeabilidad a los vapores y gases generados durante el proceso de enfriamiento del metal. Las arenas silíceas de grado metalúrgico son usadas como un agente de fluidización para óxidos básicos en variadas operaciones de fundición y como un recurso o fuente de sílice en la fabricación de diversos grados de ferrosilicio. El ferrosilicio se utiliza como un aditivo en la fabricación de acero.

Las arenas para el filtrado de agua en los acueductos son utilizadas extensivamente, y asimismo en las industrias y en las piscinas de natación y en las plantas de tratamiento de efluentes. En la Tabla 2 se puede constatar el tamaño de grano y composición química de arenas silíceas para ser usadas en el filtrado de agua de los acueductos y piscinas.

Tabla 2. Tamaño de grano típico y composición química de arenas síliceas para filtrado (CARR, 1994)

ESPECIFICACIONES QUÍMICAS	
SiO ₂	99.39
Fe ₂ O ₃	0.24
Al ₂ O ₃	0.19
TiO ₂	0.12
CaO	0.01
MgO	0.004
LOI- H ₂ O	0.046
ESPECIFICACIONES FÍSICAS	
Tamaño (mm)	Coefficiente de Uniformidad
0.4 a 0.50.	1.60 max.
0.5 a 0.60.	1.60 max.
0.6 a 0.70.	1.60 max.
0.70 a 0.80	1.60 max.
0.809 a 1.00	1.65 max.
1.00 a 1.50	1.70 max.

La arena sílicea abrasiva proviene de la fundición de la misma y se usa para obtener piedras para corte, fabricación de vidrios abrasivos, pulitura de metales y otros componentes.

Las arenas de fracturación hidráulica son utilizadas como agentes propelentes en los depósitos de petróleo y gas con el fin de incrementar la producción de los campos de petróleo y gas.

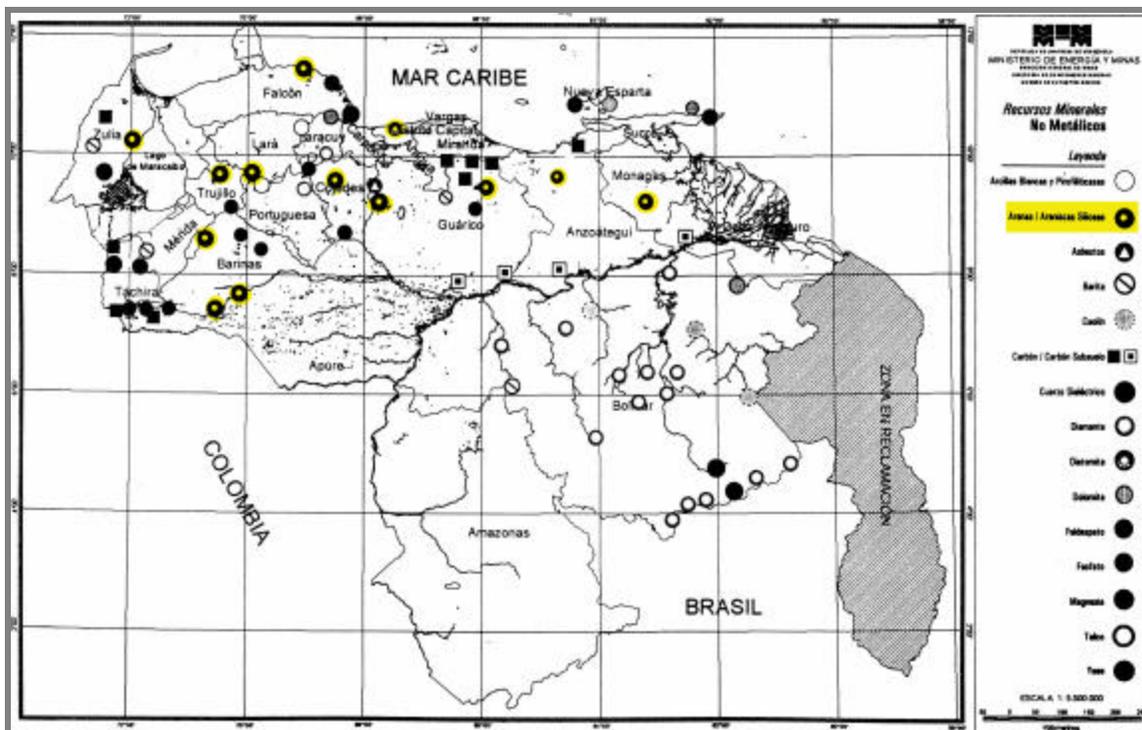
La tierra fina arenosa sílicea se usa principalmente como un suplemento en las mezclas de cauchos y productos de goma, plásticos (como refuerzo, extendedor y llenador), papel, pinturas, mezclas asfálticas, pastas y una gran variedad de otros productos.

Una multitud de otros usos incluyen arenas especiales para cementos y la fabricación de ladrillos de sílice, lozas para revestimientos de hornos refractarios, camas refractarias para fundición de metales, lavado de carbones y la industria de alfarería. Las arenas silíceas refractarias son usadas en la manufactura de silicio, asimismo, en materiales abrasivos, resistentes al impacto y a las altas temperaturas.

II.4. Reservas Nacionales

Los principales depósitos de arenas silíceas en Venezuela, tanto por sus reservas como por su calidad, se ubican en el área de Camatagua en el Estado Aragua, el Nororiente de Falcón, el Suroccidente de Lara, el Centro de Monagas, Trujillo y la región meridional del Estado Táchira. (Ver Fig. 10).

Fig. 10. Ubicación de las Principales Reservas Nacionales de Arenas Silíceas



FUENTE: M.E.M. Anuario Estadístico Minero 2003.

Las arenas silíceas de la región de Aguide en Falcón, son extremadamente blancas e incoherentes, constituidas en un 99% de granos angulares y subangulares de cuarzo.

Estimar reservas de arenas silíceas en el Suroccidente de Lara es difícil debido a la tectónica local, la pobreza en afloramientos y la lenticularidad de los depósitos; pero sin duda el distrito constituye una de las fuentes potenciales de arenas silíceas de mejor calidad del país.

Entre Aragua y Guárico hay importantes reservas de arenisca cuarzosa asociadas con la Formación Quebradón (una de las principales unidades elásticas del Terciario, en el frente sur de la Cordillera de la Costa) Estas areniscas varían del blanco cremoso hasta el marrón rojizo y meteorizan intensamente a colores rojo y amarillo rojizo. Se estima que esta zona pueda constituirse en una de las principales suplidoras de sílice industrial para las empresas de cerámica, vidrio y pego, ubicadas en la región central del país. Sólo el Estado Guárico posee una de las reservas potenciales de arenas silíceas más importantes del país.

Se estima que la región Morichal Largo en Monagas puede guardar una reserva de arenas silíceas cercanas a los 5 MMTM.

Trabajos realizados por Corpoandes y la antigua Dirección de Geología del Ministerio de Energía y Minas a lo largo del Suroriente de Táchira y de Trujillo, han puesto de manifiesto la existencia de arenas silíceas de importancia comercial con determinados volúmenes comerciales explotables a cielo abierto en esta región. Actualmente es la región más explotada, cubriendo más del 80% de la producción nacional.

En el Estado Cojedes existe una empresa que se dedica a la explotación de arenas silíceas, pero tomando en consideración los tamaños de las reservas antes mencionadas, pareciera no tener una importancia muy significativa en comparación con la producción nacional de este mineral. Asimismo, las areniscas que aquí se encuentran se caracterizan por estar muy contaminadas de mineral de hierro, con colores que varían desde el marrón claro hasta el rojo intenso, lo cual hace totalmente antieconómico el material.

En la Tabla 3 se detalla el potencial de arenas silíceas explotables en Venezuela hasta el año 2000, entre otros minerales.

Tabla 3. Principales Recursos Minerales No Metálicos de Venezuela. 2003. (Millones de T.M.)

MINERAL	VOLUMEN
Arcilla Blanca	20,0
Arenas Silíceas	65,0
Asbesto	2,0
Barita	(a) ⁴
Bentonita	10,0
Caliza	1.000,0
Caolín	40,0
Cianita	0,4
Cromo	38,0
Cuarzo y Cuarcita	(a)
Diatomita	(a)
Dolomita	100,0
Estaño, Niobio y Tántalo	(a)
Feldespato	110,0
Fosfato	1.982,0
Grafito	5,0
Granito	(a)
Magnesita	8,0
Manganeso	2,0
Talco	2,0
Tungsteno	2,0
Yeso	80,0
Total	3.466,4

FUENTE: M.E.M. Gerencia de Geología, 2003.

⁴ (a) indicios no evaluados.

II.5. Métodos de Exploración, Explotación y Procesamiento

II.5.1. Métodos de Exploración

Un gran número de formaciones geológicas que poseen potencial económico como recurso de arenas silíceas, han sido mapeadas y descritas (y por consiguiente conocidas) debido a exploraciones detalladas y trabajos de desarrollo para nuevas minas de arenas silíceas. Las cualidades requeridas para operaciones viables incluyen propiedades tales como el tipo de partícula, la composición química, los grados de cementación y la uniformidad de los depósitos. También debe ser estudiada la naturaleza y el material de desecho, la factibilidad económica de su remoción y su posible uso o disposición.

II.5.2. Métodos de Explotación

La gran mayoría de las explotaciones de arenas silíceas se realizan a cielo abierto, requiriéndose el uso de tecnología media y convencional e involucrando en su desarrollo niveles medio de inversión, sin embargo, hay minas que se laboran en galerías y subterráneos, pero su costo de producción es alto, entre otras cosas por los equipos que se utilizan y a la existencia de rigurosas leyes de protección ambiental. Los métodos de explotación de arenas silíceas dependen fundamentalmente del grado de cementación y procesamiento de la roca incluyendo la molienda, y de la clasificación de la arena silícea.

II.5.3. Procesamiento

Necesita de operaciones especializadas que varían considerablemente de acuerdo con la naturaleza de la mina, del depósito y de las características físicas y químicas del producto final.

Dependiendo del grado de cementación de la roca, muchas etapas de trituración y molienda pueden ser necesarias de acuerdo al tipo de reducción requerido. Para fraccionar las rocas silíceas se utilizan generalmente las trituradoras de mandíbula, molinos giratorios o martillos de impacto; mientras que para los granos finos se usan cribas vibratoras, tamizadores, máquinas o molinos giratorios, molinos hidráulicos y clasificadores (tanto neumáticos como otros).

II.6. Mercado Nacional: Producción y Exportación.

La producción de arenas silíceas está estrechamente vinculada con el mercado nacional, y en particular con la industria del vidrio; e igualmente son utilizadas como arenas de fundición y arenas abrasivas. La producción nacional de este mineral entre los años 1998 y 2003 obtuvo un crecimiento al pasar de 344 MTM en 1998 a 325 MTM en 2003; pero en el intervalo de estos años se notó un descenso significativo en la producción en 1999 al situarse en 295 MTM (Ver Tabla 4).

**Tabla 4. Producción de Minerales No Metálicos Registrada entre 1998 y el 2003.
(Miles de Toneladas Métricas)**

Mineral	1998	1999	2000	2001	2002	2003 ⁵
Arena Silícea ⁶	344	295	422	627	878	625

FUENTE: M.E.M. Dirección de Fiscalización y Control de la Industria Minera

⁵ Cifras sujetas a revisión

⁶ Excluye producción de minerales explotados bajo contratos con la Nación

Más del 80% de la producción nacional procede de explotaciones localizadas en el Estado Trujillo; el resto está repartido entre los Estados Monagas, Aragua y Lara. El mercado interno absorbe casi el 98% de la producción.

El mercado de exportación ha presentado un comportamiento estable al ir creciendo desde 139 T.M. en volúmenes exportados en 1998 hasta situarse en el 2003 en 940 T.M., observándose que los menores índices se registraron en el año 1999 con 79 T.M. (Ver Tabla 5). Sin embargo podemos inferir que los precios son muy variables, pues en el año 2000 por la venta de 416 T.M. se obtuvo un ingreso de 26.890 Miles de Bolívares, mientras que en el año 2001 donde se observa una producción de 534 T.M. (mucho mayor al año anterior), se obtuvo un ingreso de tan sólo 23.200 Miles de Bs.

Tabla 5. Exportaciones de Minerales No Metálicos en Venezuela en todas sus formas, de 1998 al 2003.

Mineral	1998		1999		2000		2001		2002		2003	
	TM	Miles Bs.										
Arenas Silíceas y Cuarzosa	139	13.568	79	11.859	416	26.890	534	23.200	580	89.169	940	121.080

FUENTE: I.N.E. Anuario del Comercio Exterior de Venezuela, 1998-2003

Mientras, el mercado de importación mantuvo índices promedio en los años 1998 y 2001 sobrepasando los 2.000 T.M.; luego se observó en los demás años una tendencia a la baja que lo situó en sólo 610 T.M. en el 2003 (Ver Tabla 6). Pero esta disminución sólo se hace evidente en los volúmenes importados, ya que hablando en términos monetarios, por 1.590 T.M. importadas en 1999 se invirtieron 327.559 Miles de Bolívares, y al comparar estas cantidades con las 610 T.M. importadas en 2003 en las cuales se invirtieron 655.389 Miles de Bs., observamos un significativo aumento de precio en estas importaciones.

Tabla 6. Volumen y Valor de las Importaciones de Minerales No Metálicos en Venezuela en todas sus formas, de 1998 al 2003.

Mineral	1995		1996		1997		1998		1999		2000	
	TM	Miles Bs.	TM	Miles Bs.	TM	Miles Bs.	TM	Miles Bs.	TM	Miles Bs.	TM	Miles Bs.
Arenas Silíceas y Cuarzosa	2.050	423.845	1.590	327.559	564	195.504	2.550	421.123	237	123.445	610	655.389

FUENTE: I.N.E. Anuario del Comercio Exterior de Venezuela, 1998-2003

CAPÍTULO III. FUNDAMENTO TEÓRICO DE LA FLOTACIÓN

III.1. Fundamentos del Proceso de Concentración por Flotación

III.1.1. Conceptualización

Los minerales que el hombre necesita se abastecen principalmente de la corteza terrestre. Como causales de procesos geológicos, los minerales útiles se han concentrado en yacimientos, que constituyen las fuentes primarias de éstos.

No todos los yacimientos pueden ser explotados industrialmente; sólo aquellos cuyo complejo mineral que constituye el depósito sea una “mena”, un complejo natural de minerales de donde se puede extraer, con beneficio industrial, un compuesto metálico o una fracción útil. La muestra que se toma de un mineral de algún yacimiento o mena se denomina “zafra”.

Las zafras deben tratarse previamente para que mejoren sus características y puedan cubrir las exigencias del mercado. Entre las diversas operaciones de tratamiento para los minerales se encuentra el proceso de concentración por flotación.

En su forma más simple y etimológica, la flotación es un proceso de gravedad modificado en el que el mineral finamente molido se mezcla con un líquido; el metal o compuesto metálico suele flotar, mientras que la ganga ⁷ se va al fondo, aunque puede ocurrir lo contrario. Funcionalmente, la flotación es un proceso de separación, pues mediante un tratamiento de manipulación mecánica trata de individualizar los minerales que antes estaban mezclados

⁷ Mineral que (según sea el caso) estorba, no es aprovechable o se considera contaminante.

naturalmente, basando su funcionamiento en las propiedades superficiales de las tales minerales. Esta separación puede ser colectiva (el concentrado obtenido posee dos o más minerales útiles) o selectiva (mediante un único proceso se separan diversos compuestos a partir de un complejo mineral).

Comúnmente, al concentrar un mineral por flotación, es menester recurrir a moliendas que proporcionen tamaños de partículas idóneas al proceso, además de que faciliten la liberación de las partículas componentes de la mena. La separación de estos componentes tiene lugar generalmente en agua⁸. Esta separación ocurre como resultado de la adhesión de algunas de las especies sólidas de las burbujas de aire, las cuales son introducidas en la pulpa; mientras la otra u otras se adhieren, al mismo tiempo, al agua en la que están suspendidas.

Peláez (1980), define a la flotación como *“..... un proceso de concentración de minerales que aprovecha la diferente aptitud natural o adquirida que tienen los componentes de una mena para adherirse a burbujas de aire. En flotación lo normal es que el mineral útil que se quiere extraer se recoge en la espuma mientras los demás, permanecen en la pulpa (flotación directa), en el caso contrario, que se flote la ganga por ser el mineral menos abundante, el proceso suele llamarse flotación inversa”*.

Kelly (1990), también la define como *“... el principal proceso de concentración basado en la química interfacial de las partículas minerales en solución”*.

⁸ En la mayoría de los procesos de flotación modernos se emplean aceites u otros agentes tensioactivos para ayudar a flotar al metal o a la ganga. Esto permite que floten en agua sustancias de cierto peso.

En este orden de ideas y tomando en consideración la definición de los autores anteriormente señalados, se puede decir que la flotación es un proceso de concentración de minerales generalmente de baja ley, que emplea la capacidad natural o adquirida que poseen los componentes de una mena mediante reactivos colectores para adherirse a burbujas de aire; éste se fundamenta en una interrelación entre la química interfacial, la química coloidal, la cristalografía y la física interfacial.

III.1.2. Importancia de la Flotación

En los albores del siglo pasado este proceso revolucionó la industria de los minerales y debe considerarse como un paso muy importante en el avance tecnológico del hombre. La flotación es hoy el método más importante de concentración mecánica por los siguientes motivos:

- Es el método más versátil de concentración de minerales al convertir yacimientos complejos y de baja ley en menas para la explotación industrial.
- Reduce costos en la producción, pues sus procesos son “sencillos”
- Los aparatos necesarios en el procedimiento requieren poco espacio horizontal y altura.
- Se utiliza para procesar casi todos los minerales sulfurosos y se aplica extensamente para los minerales metálicos no sulfurosos, los minerales industriales y el carbón mineral.

- Ha permitido explotar muchos depósitos minerales de baja concentración, e incluso residuos de plantas de procesamiento que utilizan técnicas menos eficientes.

III.2. Características de las Fases e Interfases que Intervienen en el Proceso de Flotación

III.2.1. Fases

En flotación se hace necesario considerar tres fases: sólida (mena), líquida (agua) y gaseosa (aire), con sus correspondientes interfases para producir los fenómenos y reacciones que modificarán el comportamiento de las partículas, debido a que la diferencia entre las energías superficiales que poseen éstas servirá para separar los componentes de la mena.

III.2.1.1. Fase Sólida

Está constituida por la mena, sustancias que poseen estructura cristalina porque de esa forma están ordenados sus átomos o moléculas, denominada red cristalina. Dependiendo sean las unidades que formen la red, sus propiedades físicas serán diferentes; pudiéndose clasificar los cristales en moleculares, iónicos y atómicos.

- Los cristales moleculares están débilmente unidos entre sí, como lo manifiestan las bajas temperaturas de fusión y ebullición; este tipo de enlace físico es denominado de Van der Waals.
- Los cristales iónicos son un agregado de iones positivos y negativos en equilibrio. El enlace químico se caracteriza por un intercambio de electrones entre los átomos para completar las capas electrónicas hasta

su máxima capacidad. Por ejemplo un cristal de sal común donde no hay moléculas, pues cada ión está rodeado por otros con distinta carga.

- En los cristales atómicos el enlace puede ser covalente o metálico. En el primero se comparten electrones porque no tienen suficientes para completar octetos estables, y en el segundo se encuentra un exceso de electrones que forman la nube electrónica.

En los aparatos de fragmentación se aplican fuerzas exteriores las cuales rompen partículas minerales, y por ende, enlaces físicos y químicos, donde en las nuevas superficies aparecen fuerzas que son consecuencias de quedar en ellas enlaces sin saturar. Estas tienen gran influencia en la flotación, pues determinan el comportamiento de las partículas en éste proceso.

El carácter de las nuevas superficies depende de la forma cómo fragmente el mineral, de su sistema cristalino, de la existencia o no de planos de cruce y de la dependencia de la unión de los cristales estén formados por iones, átomos o moléculas. Cuando se rompen enlaces iónicos o covalentes se origina un campo eléctrico fuerte, mientras que si se rompen enlaces moleculares se dará origen a un campo débil.

En las reacciones que se producen en la pulpa entre la superficie mineral y el agua, ésta última influirá; ya que es un líquido polar pues su molécula constituye un dipolo, y al contener hidrógeno puede dar lugar a un enlace de hidrógeno.

Por eso la flotabilidad natural de un mineral está relacionada con sus propiedades superficiales: si en ésta predominan los enlaces sin saturar, iónicos o atómicos, reaccionará con las moléculas de agua que se

adherirán a ellas y las mojarán (hidrófilos). Si por el contrario, los que predominan son los enlaces saturados, las condiciones para que se adhieran en la superficie mineral las moléculas de agua son mucho menos favorables, por lo que ésta será repelente al agua (hidrófobos); y por consecuencia serán fáciles de flotar.

La superficie mineral puede reaccionar con algunos gases, en especial con el oxígeno disuelto en el agua. De esta manera, los minerales hidrófilos pierden en cierto grado esta propiedad al absorber oxígeno en su superficie.

Con frecuencia en la génesis de los minerales se pueden presentar fenómenos de isomorfismo, es decir, la formación de soluciones sólidas por sustitución mutua en las redes cristalinas de dos sustancias de sus átomos o iones. La condición esencial para que se produzca dicha sustitución es que los rayos iónicos o atómicos sean aproximadamente iguales y que la posición que ocupa un ión en la red sea tomada por otro ión del mismo signo.

Las sustituciones isomórficas no producen alteración alguna, pero tienen consecuencias importantes en las reacciones entre los minerales y los reactivos de flotación.

III.2.1.2. Fase Líquida

Esta fase está determinada por el agua dada su abundancia, facilidad de adquisición y propiedades. En casos especiales se debe purificar parcialmente antes de usarla, ya que puede contener sales de calcio, magnesio o sodio que pueden aumentar el consumo de reactivos o producir cambios en algunos minerales.

En la molécula de agua, los átomos de hidrógeno están colocados en relación con el de oxígeno de manera que forman un ángulo de $109^{\circ} 30'$ y por ello las cargas eléctricas son distribuidas asimétricamente. Al dipolo así formado, debe sus propiedades polares y la tendencia de sus moléculas a reunirse en grupos complejos. Por causa de dicha polaridad los iones minerales e hidratan en soluciones acuosas, pues se asocian un número de moléculas de agua que es directamente proporcional a su carga eléctrica e inversamente a su tamaño (rayos iónicos); es decir, que la energía de hidratación es mayor cuanto mayor sea la carga y menor el diámetro, cosa que también ocurre con la energía de la red cristalina. En los minerales, si la energía de hidratación es superior a la fuerza de enlace cristalino, éste se disolverá y, entre los compuestos de un mismo catión, la solubilidad será inversamente proporcional al radio del anión. Cuando crece la valencia aumenta la energía de hidratación, pero más despacio que la de la red; por lo que la solubilidad disminuye.

Cuando un sólido de la pulpa se hidrata, la adsorción del agua en su superficie tiene un carácter intermedio entre la adsorción física y la química. Las moléculas de agua cercanas a la superficie mineral se colocan orientándose hacia la distribución de sus polos, mientras las más lejanas, no están bien orientadas ni unidas porque están afectadas por la difusión y los movimientos en el líquido.

En flotación, el comportamiento de los sólidos está relacionado con su capacidad para hidratarse o no, pues de ella depende que el sólido se moje o repela el agua. Una sustancia que no posea polaridad o que sea inactiva eléctricamente no tendrá condiciones para atraer moléculas de agua. En cambio, las sustancias activas eléctricamente se hidratarán y el dipolo del agua se adherirá a ellas con más o menos fuerza. Por este motivo los sulfuros son más fáciles de flotar que los óxidos. Empleando un reactivo

apropiado se puede convertir en hidrófoba la superficie del mineral con más facilidad en los sulfuros, donde el dipolo del agua está adherido con menos fuerza.

III.2.1.3. Fase Gaseosa

Está comprendida por el aire, que según los aparatos se utiliza como presión atmosférica o comprimido. Se introduce en las máquinas con la pulpa, disuelto en el agua, y mecánicamente mediante dispositivos que tiene el propio aparato de flotación. El aire disuelto contiene más O_2 y CO_2 que el atmosférico.

El rol del aire en el proceso es doble; en la primera, lleva a las interfases el O_2 y los demás gases existentes en el aire que se utiliza y en la segunda, sirve para agitar la pulpa y para transportar las partículas del útil a la espuma. Las burbujas de aire, durante su ascenso, aumentan de superficie al ir disminuyendo la presión hidrostática y la presión superficial del agua, papel que juegan los reactivos que se añaden con este fin.

De los gases contenidos en las burbujas, el O_2 , el CO_2 y el vapor de H_2O son los que más influyen en flotación; el O_2 contribuye a hacer la superficie mineral hidrófoba, y el vapor de H_2O aumenta la humedad y por consiguiente la oxidación.

III.2.2. Interfases

Para el estudio del proceso de flotación se toman en cuenta dos aspectos fundamentales: uno es la termodinámica de la adsorción sobre las superficies minerales, y el otro es la interfaz gas – líquido, entre otras.

III.2.2.1. Termodinámica de la Adsorción

La adsorción en una interfase se describe mediante la ecuación de adsorción de Gibbs. La interfase gas-líquido desempeña un importante papel en los fenómenos de adsorción cuando los líquidos contienen sustancias disueltas, es decir, cuando son soluciones. Estas sustancias generalmente están en distinta concentración en el líquido mismo y en su interfase con el gas. El cambio de concentración que la materia disuelta presenta entre el líquido y su interfase con el gas se llama adsorción. Al introducir un líquido orgánico heteropolar, el sistema trata de llegar a un nuevo estado de equilibrio y tiende a buscar un mínimo de energía. Esto se logra por la adsorción selectiva de los compuestos heteropolares en la interfase gas-líquido, neutralizando la energía superficial, y por ende, reduciendo la tensión superficial. La adsorción es positiva para compuestos orgánicos heteropolares, ya que la concentración de éste es mayor en la interfase que en el líquido.

La adsorción física involucra la adherencia de moléculas sin cambio químico, mientras que en la adsorción química los compuestos adsorbidos pierden su individualidad química y forman nuevos compuestos.

III.2.2.2. Interfase Gas-Líquido

La adsorción en la interfase gas – líquido (o aire-agua) es de interés primordial en el proceso de flotación. Todo líquido en equilibrio con su vapor se caracteriza por la existencia en su superficie de una cierta cantidad de energía libre, cuya magnitud es definida por la tensión superficial.

En el líquido las moléculas se atraen o repelen mutuamente, y estas fuerzas se compensan entre sí dentro del mismo; por lo que la resultante

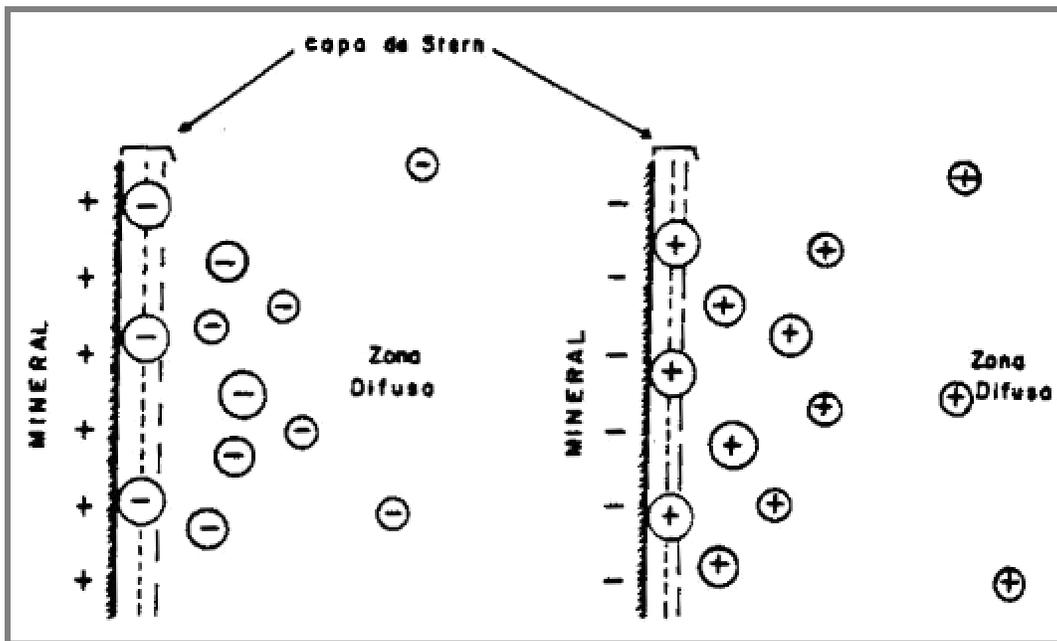
de fuerzas es, en consecuencia, nula. Sin embargo, las moléculas que se ubican en la superficie no son compensadas completamente, pues parte de su volumen está orientado hacia la fase gaseosa, donde la dilución de la materia es de tal orden que prácticamente representa el vacío, donde por supuesto no hay suficientes moléculas para adsorber la presión de la película superficial. De esta manera se crea una cierta cantidad de energía libre, cuya magnitud se mide por la tensión superficial; la cual va a depender del tipo de enlace químico que posean las moléculas.

Los agentes de acción superficial empleados para controlar la espuma en la flotación son los espumantes, los cuales en su mayoría son alcoholes. En la flotación también se emplean colectores, que son compuestos orgánicos heteropolares requeridos para adsorber; tanto en la interfase mineral-agua como la interfase aire-agua. Su función en la flotación consiste en adherir en forma selectiva las partículas de mineral a las burbujas de aire. Los colectores por lo general son electrólitos, razón por la cual difieren de los espumantes, de manera que debe considerarse también la adsorción de las especies iónicas en la interfase aire-agua.

III.2.2.3. Doble Capa Eléctrica

La adsorción que tiene lugar en la superficie de una partícula mineral es regulada en gran medida por la naturaleza eléctrica de esa superficie. Si una especie iónica es adsorbida en una interfase, entonces también deben adsorberse contraiones por la electroneutralidad. El modelo que ilustra una superficie mineral y la doble capa eléctrica se conoce como “Modelo de Stern” (Ver Fig. 11)

Fig. 11. Doble Capa Eléctrica o Capa de Stern



La doble capa eléctrica está formada por dos capas; una adsorbente en la cual el potencial electroquímico no es grande, y una capa de difusión la cual va a depender de la concentración de la solución y de las condiciones hidrodinámicas del sistema. Esta tiene gran importancia, porque influye directamente en la adsorción de los reactivos sobre la superficie de los minerales. Se ha observado una relación directa entre el valor del potencial eléctrico y la cantidad de moléculas o iones adsorbidos. La adsorción de moléculas orgánicas aumenta con la disminución del potencial y es máxima cuando el potencial es nulo.

Cuando el sólido empieza a moverse en el líquido, los iones que forman la capa adsorbente del potencial electroquímico quedan firmemente asociados con la superficie; mientras que los iones de la zona de difusión quedan inmóviles o se mueven en otra dirección. El potencial que surge entre las dos superficies cargadas eléctricamente que se mueven en

direcciones distintas, se llama “potencial electrocinética” o “potencial zeta”. Existe relación entre el potencial y la flotación sólo cuando el colector se adsorbe físicamente en la doble capa. La adsorción se produce en este caso gracias a la acción de fuerzas químicas específicas entre la superficie de mineral y las moléculas del colector. A menudo se produce una reacción química entre los iones del colector y los iones de la superficie del mineral.

III.2.2.4. Interfase Sólido-Líquido

Entre las operaciones de procesamiento de minerales que se efectúan en el agua, es interesante la naturaleza de la interfase sólido – líquido (o mineral – agua). En los procesos de flotación, floculación y aglomeración es obvia la importancia de esta interfase.

La adsorción de iones procedentes de la solución en la interfase mineral-agua depende tanto de la composición química y la estructura de la superficie mineral, como de la doble capa eléctrica de la interfase. Esta adsorción puede deberse a una reacción química entre la especie adsorbente y los iones que comprenden la superficie mineral; es decir, a la quimiadsorción, o bien puede ser adsorción física de los contraiones en la doble capa eléctrica. La quimiadsorción se define arbitrariamente como un proceso de adsorción en el cual la energía libre de adsorción es del orden de ≥ 40 KJ/mole.

Las superficies o partículas sólidas sumergidas en agua son objeto de hidratación, lo que depende del carácter de la superficie de los sólidos; es decir, de las características eléctricas que existen en la superficie. Esta hidratación es más fuerte en las especies en que se rompieron enlaces químicos (enlaces iónicos o covalentes).

III.2.2.5. Mojado y Contacto de Tres Fases

Esta interfase debe establecerse para una partícula que ha de recolectarse en los procesos de flotación y de extracción de aceites.

La creación de una interfase mineral-aire con la destrucción simultánea de las interfases agua-aire y mineral-agua de igual área, genera el fenómeno de la flotación. La adherencia de la partícula de mineral a una burbuja se origina cuando:

En su estado natural, en el agua, la mayoría de los minerales son hidrofílicos. La adhesión de una partícula a una burbuja en la flotación, se puede considerar en tres etapas:

- El acercamiento de la burbuja y la partícula.
- La disminución de la película de agua entre la burbuja y la película hasta que ocurra la ruptura.
- El establecimiento del contacto en equilibrio.

La película de agua se comporta como si una presión en exceso estuviera actuando en dirección normal a la película y en oposición al adelgazamiento de ésta. Cuando la película es suficientemente delgada, esta presión se origina como resultado de las fuerzas de Van der Waals; la unión del hidrógeno y la deformación de las dobles capas eléctricas.

El adelgazamiento de la película humectante depende en esencia de las constantes de Van der Waals para la atracción del agua a la superficie mineral y del agua a sí misma. Las fuerzas de Van der Waals se oponen al

adelgazamiento de la película humectante así como a la ruptura de la película.

La vida de la película, que se define como el tiempo necesario para que la película disyuntora se adelgace para llegar a un espesor tal que tenga lugar la ruptura, recibe el nombre de “tiempo de inducción”.

III.2.2.6. Contacto Interparticular

El proceso de interacción entre partículas puede ocurrir de diversas formas como la adherencia de partículas muy finas a una grande, el agrupamiento de partículas (aglomeración, floculación) o la interacción de las partículas finas al experimentar sedimentación, filtración o aglomeración para formar bolas. En cada caso, la partícula que está en solución de agua tendrá una doble capa eléctrica alrededor de ella. Esta doble capa eléctrica puede interaccionar debido a la estrecha proximidad existente entre las partículas. Si las partículas son de cargas opuestas, podría resultar una atracción electrostática en la adhesión o adsorción de una partícula fina sobre la superficie de una más grande; esta situación ocurre frecuentemente en los sistemas de flotación, debido a la selectividad reducida en presencia de finos y además representa la base de la flotación. Cuando el signo de la carga de las partículas es el mismo, la situación es más compleja.

III.2.2.7. Determinación de las Propiedades Interfaciales

La energía interfacial y el potencial zeta representan propiedades de suma importancia para el estudio de las interfases.

La tensión superficial o energía libre interfacial entre líquido o aire y la superficie mineral determina la medición del ángulo de contacto. Los ángulos de contacto pueden predecirse usando el concepto de una tensión superficial crítica para el mojado de una superficie sólida.

La determinación del potencial zeta de una partícula mineral en contacto con una solución se puede llevar a cabo mediante el empleo de diversos métodos. Dos técnicas muy usadas son la medida del potencial en corriente y la medida de la movilidad electroforética.

El método del potencial en corriente consiste en el paso de una corriente de la solución a través de un tapón poroso de partículas (relativamente gruesas) montado entre electrodos. Se mide la caída de presión a través del tapón y la diferencia de potencial entre los electrodos. En el método de electroforesis, las partículas finas individuales que se mueven a través de una solución entre dos electrodos se observan a través de un microscopio.

III.3. Reactivos de la Flotación

Los Reactivos de flotación se definen como la mayoría de los minerales que son naturalmente hidrofílicos (KELLY, 1990). Para lograr una separación por flotación, las superficies del mineral tienen que volverse selectivamente hidrofóbica. Esto puede lograrse mediante la regulación de la química de la solución, seguida por la adición de un colector que selectivamente se adsorba y proporcione la superficie hidrofóbica requerida.

La regulación de la química de la solución puede abarcar la adición de reactivos, ya sean activadores (que aumentan la selectividad intensificando la succión de colectores) o de procesadores (que retardan o evitan la adsorción del colector). También pueden incluir la adición de un dispersor para asegurar que

las superficies minerales estén libres de partículas finas, o el uso de carbón activado para remover de la solución los iones o moléculas indeseables.

Cuando se requiere comprender los procesos de concentración de minerales, se hace necesario estudiar la superficie de los minerales en cuanto a propiedades químicas y físicas, así como también, son las interacciones que ocurren con las fases sólidas, líquidas y gaseosas, además de las interfases que ocurren entre ellas.

El colector es el más decisivo de los reactivos de la flotación. Los colectores son moléculas o iones orgánicos que se absorben selectivamente sobre las superficies minerales. Tienen que convertir en hidrofóbica la superficie del mineral para que, en equilibrio, haya adherencia entre burbuja y partícula.

La mayoría de los colectores son ácidos débiles, bases o sus sales. Son heteropolares y puede considerarse que tienen dos extremos funcionales: uno iónico, que puede ser adsorbido en la superficie mineral ya sea por reacción química con los iones de la superficie mineral (quimiadsorción) o por atracción electrostática a la superficie mineral (adsorción física), y el otro una cadena o grupo orgánico, que proporciona la superficie hidrofóbica al mineral.

Otro grupo de reactivos que intervienen en la flotación son los espumantes. Estos tienen dos funciones: mejorar la dispersión de las burbujas finas en la pulpa y controlar las características de la espuma.

Los colectores aniónicos de oxihidrido se utilizan para la flotación de minerales no sulfurosos. Incluidos en este grupo están los carboxilatos, los sulfatos orgánicos y los sulfonatos. Los carboxilatos ácidos grasos y los jabones correspondientes (sales de Na⁺) son los de uso más frecuentes, normalmente como una combinación que se ha extraído como un subproducto de una planta

natural o de una fuente de grasa animal no saturada. El colector de ácido graso de uso más frecuente se comercializa como “aceite de pulpa de madera” (tall oil), un subproducto de la pulpa de madera. Este aceite contiene aproximadamente 50 % de ácido oléico y en cantidades menores ácido linoléico, lo rosínico (abiético) y linolénico.

Los colectores catiónicos tienen un grupo polar con carga positiva asociada con la cadena o grupo de hidrocarburos hidrofóbicos. Generalmente son aminas, aunque también hay en uso éter- aminas. Se han utilizado desde aminas primarias hasta aminas cuaternarias, pero son las primarias y secundarias las que se usan comúnmente. Estos colectores se derivan a menudo de grasas naturales y se comercializan con frecuencia bajo el mismo nombre de la fuente de grasas en particular (por ejemplo, acetato de la amina grasa animal). Se emplean varios grupos de hidrocarburos: los de alquil y los de aril, quedando limitada la longitud de cadena de grupo por solubilidad de la amina .

III.4. Flotación de Óxidos y Silicatos

Existe una amplia gama de minerales de óxidos y silicatos que se concentran por flotación, utilizando colectores tanto aniónicos como catiónicos.

Tanto los colectores aniónicos como catiónicos son adsorbidos física o electrostáticamente en los óxidos y silicatos.

El potencial de la superficie (potencial zeta) de los minerales de óxidos y silicatos depende del PH de la solución. Para que ocurra adsorsión del colector, el potencial de la superficie mineral debe ser negativo para colectores catiónicos, y positivo para los aniónicos.

Para que haya flotación efectiva, es necesario que los colectores tengan 10 o más átomos de carbono en la cadena de hidrocarburos, como por ejemplo, el colector CYANAMIND AERO 801 R, 825, 840 Y 899 R promotores.

La mayoría de estos promotores son aniónicos, de sulfato de petróleo ampliamente usados por el circuito ácido de flotación de minerales de hierro e impurezas de partículas de hierro, provenientes de arenas silíceas y feldespatos.

Los modelos 801R y 899R son solubles en agua a temperatura del laboratorio, alimentado de 10 % - 30 % en solución.

Los modelos 825 y 840 son diluibles en agua vigorosamente agitada. En agua caliente improvisan la dispersión; alimentado de 5 % - 20 % de dispersión en agua. Puede mezclarse con los hidrocarburos y aceite combustible con la mayoría de los flotadores y ácidos grasos. Pueden ser calentados a 82 °C máximo, reducen la viscosidad del producto y pueden usarse tanto en circuitos de ácidos fuertes como en los circuitos alcalinos”.

El peso molecular aumenta en los modelos 801R, 899R, 825, 840.

III.5. Acondicionamiento: Efectos del Tamaño de la Partícula

El efecto del tamaño de partícula en la recuperación por flotación se atribuyó al arrastre de partículas en la espuma, pero también intervienen otros factores. La presencia de una fracción considerable de finos o lamas es, en general, perjudicial para la flotación de las partículas más gruesas por el exceso de reactivo tomado por los finos con mayor relación de área de superficie a masa y por la posible adsorción de estos finos sobre las partículas de mineral más grandes. Desde hace muchos años se sabe que mediante el acondicionamiento

separado de las fracciones finas y gruesas, es posible obtener mejores recuperaciones y mejor selectividad en la fracción gruesa.

III.6 Cinética de la Flotación

Aunque se ha reconocido a la flotación como un proceso de rapidez durante muchos años, el control deliberado y el uso de diferencias en la rapidez de flotación para mejorar la selectividad han sido limitados. Recientemente se ha observado que el control de la cinética de la flotación mediante la adición de reactivos, puede ser tan importante como el control del “equilibrio” o de la “recuperación máxima”.

CAPÍTULO IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La mena en estudio proveniente de la Arenera “El Pozote”, Tinaquillo, Estado Cojedes; presenta impurezas de óxidos de hierro, las cuales se disminuirán mediante el proceso de concentración por flotación inversa, utilizando dos colectores iónicos: uno de ácidos grasos (FATTY ACID 152, ARR –MAZ) y otro de Sulfonato de Petróleo (AERO PROMOTER 801R, CYANAMID); con el fin de adsorber selectivamente las superficies minerales de dichos óxidos y hacerlo útil y rentable para su uso como materia prima en diversas industrias como la del vidrio, la metalúrgica y filtración.

IV.1. Preparación Mecánica de la Muestra

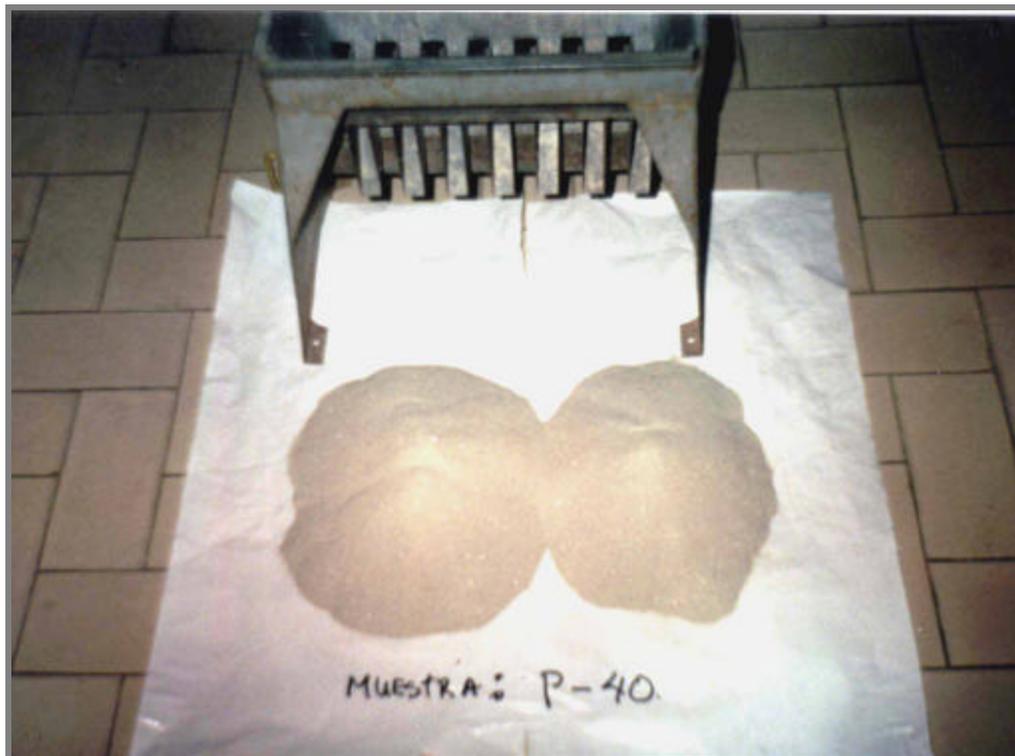
En el Laboratorio de Preparación y Concentración de Menas del Departamento De Ingeniería de Minas, se recibieron cuatro (4) sacos de cuatro (4) muestras diferentes denominadas Arena Lavada #1, Arena Lavada #2, Pasante de la Malla 40 (P-40) y Polvillo o Rebose. Estas muestras recibidas en Todouno, al no ser aptas para utilizarlas directamente, se someten preliminarmente a los tratamientos de homogeneización, cuarteo, atricción o lavado, corte de malla, secado, difracción de rayos X y análisis granulométrico, para mejorar sus características y acondicionarlas para el proceso de alimentación de la concentración por flotación.

IV.1.1. Homogeneización y Cuarteo

Como las todas muestras recibidas son arenas de tipo sedimentarias, se procede a utilizar la técnica de homogeneización mecánica manual, mezclándolas a cada una en forma repetitiva hasta que la composición física de cada material se vuelva homogénea en cualquier punto. Luego se cuarteo separadamente en el “Cuarteador Jones” (Ver Fig. 12), un aparato mecanizado

manual en el que se vierten las porciones separadas en lotes iguales para tomar muestras representativas de 20 kg de cada material: Arena Lavada #1, Arena Lavada #2, P-40 y Polvillo o Rebose. Luego se secan en una mufla por un lapso de veinticuatro (24) horas, a una temperatura de 200 °C para eliminarles la humedad.

Fig. 12. Cuarteador Jones preparando a la muestra P-40 para la Atricción.



IV.1.2. Atricción o Lavado

Con el objetivo de eliminar las lamas ⁹ contenidas en las muestras Arena Lavada 1, Arena lavada 2 y P-40 se efectuó el proceso de atricción en el atricciónador de la planta de lavado de minerales (Fig. 13, Fig.14 y Fig.15).

⁹ Partícula que tiene un tamaño desde los 10 micrones hasta el polvo impalpable.

Para ello, se usaron 20 kg de muestra en dos grupos, con una dilución de pulpa 3:1 (tres partes de agua y una de mena), durante un lapso de 20 minutos.

Fig. 13. Pulpa en el Tanque de Lavado de la Máquina de Atricción



Fig. 14. Lavado



Fig. 15. Producto de la Atricción



El rebose se lavó en “Rot Tap”, agregando agua continua cuando este estaba en movimiento de agitación del material, hasta que el agua de lavado no mostrara lamas.

IV.1.3. Corte de Malla y Secado

Para realizar los ensayos de flotación se hizo un corte de malla consecuente con las especificaciones para la fabricación de vidrio plano descritas en la Tabla 1 del capítulo II (Pág. 22), correspondiente al tamaño de grano entre mallas $-20 +150$. Este corte de malla se hizo en un tamizado húmedo, en el equipo de “Rot Tap” para verificar la limpieza del material una vez realizado el proceso de atricción de las muestras Arena Lavada # 1, Arena Lavada # 2, P-40 y Rebose. Luego se secaron cada una de las muestras separadas en sus respectivas mallas en la mufla de secado, por un tiempo de veinticuatro (24) horas a una temperatura de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, aproximadamente.

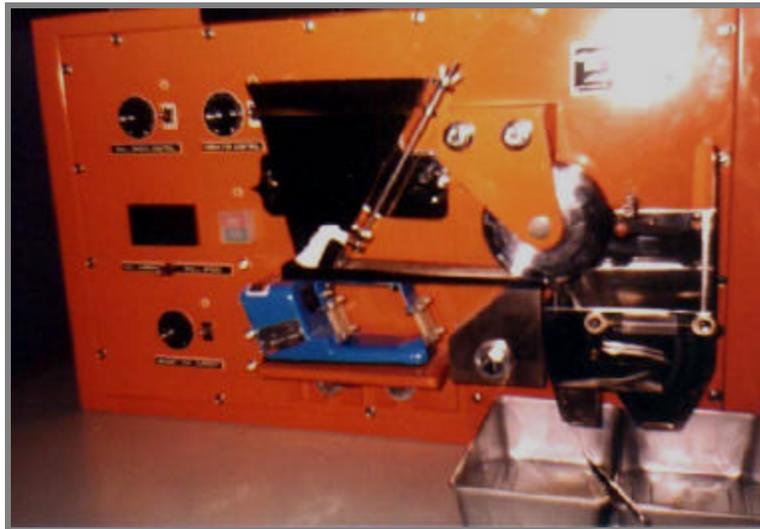
IV.2. Caracterización de la Muestra

La identificación de las características de las partículas es un aspecto esencial del procesamiento de minerales, ya que el producto siempre tiene que satisfacer una especificación de forma, composición química o tamaño; además que el proceso aporta valiosa información en cuanto a minerales presentes y su discriminación entre útiles y ganga. Con una buena caracterización de la muestra se obtienen cualitativamente las diferencias de comportamiento entre uno y otro material en determinado proceso, ya sea por la forma o el tamaño de la partícula, su grado de liberación y/o contenido mineralógico, entre otros.

IV.2.1. Difracción de Rayos X

En un equipo denominado “Separación Magnética marca Carpco, Modelo MLH (13) 111-5”¹⁰, se concentraron las cabezas en cada una de las muestras (Ver Fig.16).

Fig. 16. Equipo de Separación Magnética



¹⁰ Este equipo es capaz de seleccionar materiales que contienen pequeñas o grandes diferencias de susceptibilidad magnética.

Este equipo es capaz de seleccionar materiales que contienen pequeñas o grandes diferencias de susceptibilidad magnética. Utiliza un canal alimentador vibratorio que transporta al material de forma horizontal hasta una zona con un campo magnético ajustable, entre el rodillo girador (polo sur del campo magnético) y el polo norte del campo magnético fijo. Puesto que las líneas de fuerza magnética van desde el polo norte hasta el sur, los materiales magnetizados se adhieren a la superficie del rodillo y llegan hasta un cepillo que los desprende, provocando su caída hasta una bandeja destinada para su recolección. Por su parte, los materiales no magnetizados siguen en el canal vibratorio hasta caer en la bandeja.

La Figura 17 contempla el difractómetro de Rayos X (DRX) marca Philips modelo PW3710, ubicado en la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales. Una vez culminado el paso de las muestras por el equipo de separación magnética, se toma una pequeña cantidad del material de cada uno de los separados magnéticos y se trituran hasta obtener un polvo muy fino que se coloca en el porta muestras destinado para dicho estudio. Una vez allí, y con las siguientes condiciones: a) tensión de corriente del generador: 40KV y 30 mA; b) tubo ánodo: Cu (λ) = 1.5405 Å; c) velocidad (2θ /seg); d) Rango de ángulo de barrido: $2\theta_i = 3^\circ$, $2\theta_f = 85^\circ$; y e) tamaño de rendija (slit): 0.2 mm, la muestra para se prepara esparciendo uniformemente el polvo sobre un portaobjeto especial y comprimiéndolo suavemente para lograr una superficie exterior lo más plana posible.

Fig. 17. Difractómetro de Rayos X



Este instrumento está construido de tal forma que la cápsula, con la muestra preparada en forma adecuada, gira según la trayectoria de un haz colimado de rayos X. Cuando el tubo detector recorre la zona, se registra en la cinta el pico de la reflexión procedente de la muestra. El ángulo 2θ , al cual se ha producido la reflexión, se puede leer directamente de la posición del pico en el papel. Las alturas de los picos son directamente proporcionales a las intensidades de los efectos de difracción que los causaron.

Los cristales poseen una estructura ordenada tridimensional con periodicidades características a lo largo de los ejes cristalográficos. Cuando un haz de rayos X choca contra tal distribución tridimensional, hace que los electrones que encuentran en su trayectoria vibren con una frecuencia de la radiación X incidente. Estos electrones vibrantes absorben parte de la energía de los rayos X y actuando como fuente de nuevos frentes de onda emiten (dispersan) esta energía como radiación X de la misma frecuencia y longitud de onda. En general, las ondas dispersas interfieren destructivamente, pero en

algunas direcciones específicas se refuerzan entre sí para producir un efecto de dispersión cooperativo que recibe el nombre de difracción.

Por el análisis difractométrico realizado conocemos que la muestra está compuesta por Goethita (HFeO_2), Hematita (Fe_2O_3), Ilmenita (TiO_3Fe), Muscovita ($\text{AlSi}_3\text{O}_{10}\text{KAl}_2(\text{OH})_2$) y Caolinita ($\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{Al}_4(\text{OH})_8$).

IV.2.2. Análisis Granulométrico

De cada muestra: Arena Lavada # 1, Arena Lavada # 2, Material Pasante de la malla Tyler 40 (P-40) y material Rebose; se procedió a colocar un kilogramo, de cada una en el equipo “Rot Tap” y una serie de tamices marca Tyler y/o sus equivalentes A.S.T.M, en forma de una batería, por un lapso de tiempo de diez minutos con un movimiento vibratorio, el cual permitió clasificar el material por el tamaño de partículas. Este ensayo de granulometría es esencial, pues su resultado es una variable importante en los procesos subsecuentes de beneficio del mineral.

Este ensayo granulométrico se hizo con material seco y húmedo en el equipo “Rot tap”.

Las tablas (7, 8, 9 y 10) con sus correspondientes gráficos (1, 2, 3 y 4) corresponden a los análisis granulométricos de la zafra. Mientras que las tablas (11, 12, 13 y 14) con sus correspondientes gráficos (5, 6, 7 y 8) corresponden a los análisis granulométricos del corte de malla de cada una de las muestras.

Tabla 7. Distribución Granulométrica de la Zafra Arena Lavada # 1.

Malla Tyler / A.S.T.M.	Abertura [mm]	Peso [grs.]	Retenido [%]	Acumulado [%]
10	1,68	264,30	26,43	26,43
14	1,19	51,40	5,14	31,57
16	1	26,10	2,61	34,18
20	0,841	39,20	3,92	38,10
35	0,42	99,00	9,90	48,00
50	0,297	111,50	11,15	59,15
100	0,149	183,90	18,39	77,54
150	0,105	72,60	7,26	84,80
200	0,074	38,50	3,85	88,65
270	0,053	34,50	3,45	92,10
325	0,044	13,70	1,37	93,47
-325,00	0,01	65,30	6,53	100,00
		934,70		

Gráfico 1. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Zafra Arena Lavada # 1

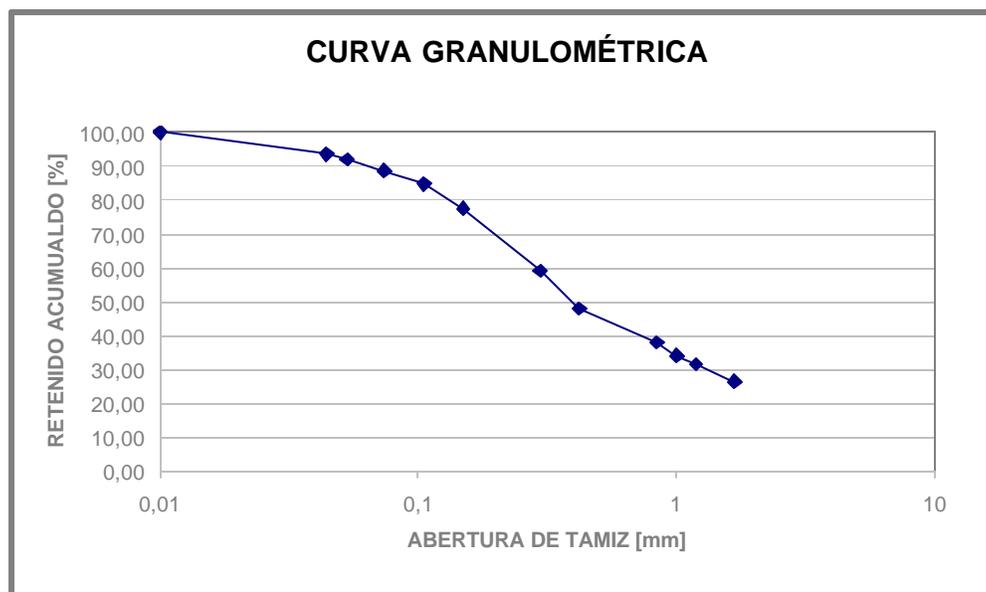


Tabla 8. Distribución Granulométrica de la Zafra Arena Lavada # 2

Malla Tyler / A.S.T.M.	Abertura [mm]	Peso [grs.]	Retenido [%]	Acumulado [%]
10	1,68	327,00	32,70	32,70
14	1,19	50,00	5,00	37,70
16	1	29,40	2,94	40,64
20	0,841	38,15	3,82	44,46
35	0,42	97,87	9,79	54,24
50	0,297	97,26	9,73	63,97
100	0,149	186,70	18,67	82,64
150	0,105	52,64	5,26	87,90
200	0,074	23,90	2,39	90,29
270	0,053	38,70	3,87	94,16
325	0,044	1,20	0,12	94,28
-325,00	0,01	57,18	5,72	100,00
		942,82		

Gráfico 2. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Zafra Arena Lavada # 2

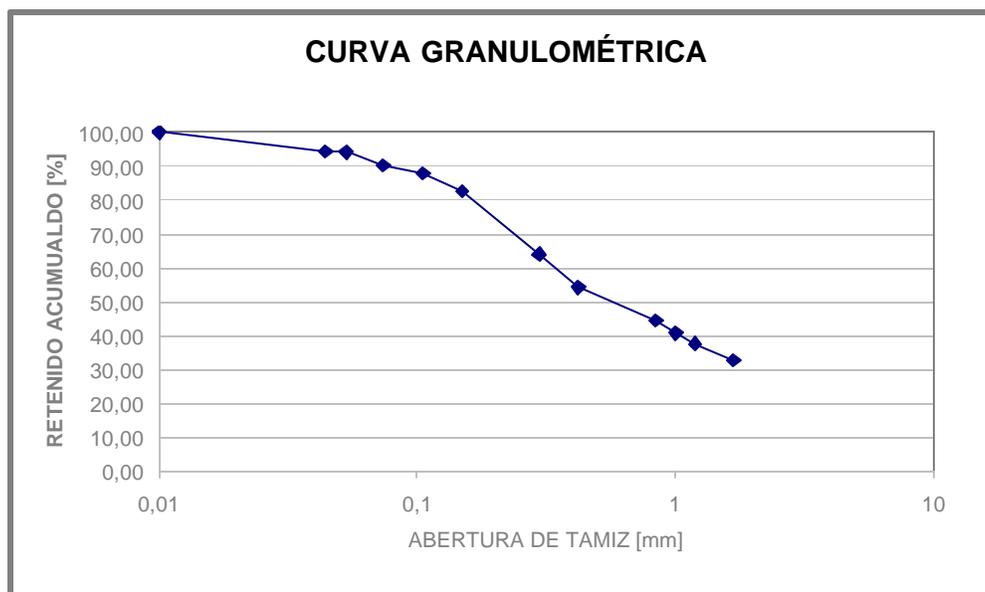


Tabla 9. Distribución Granulométrica de la Zafra P - 40

Malla Tyler / A.S.T.M.	Abertura [mm]	Peso [grs.]	Retenido [%]	Acumulado [%]
10	1,68			
14	1,19			
16	1			
20	0,841			
35	0,42	0,90	0,09	0,09
50	0,297	285,70	28,57	28,66
100	0,149	490,00	49,00	77,66
150	0,105	114,50	11,45	89,11
200	0,074	54,70	5,47	94,58
270	0,053	27,00	2,70	97,28
325	0,044	12,60	1,26	98,54
-325,00	0,01	14,60	1,46	100,00
		985,40		

Gráfico 3. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Zafra P - 40

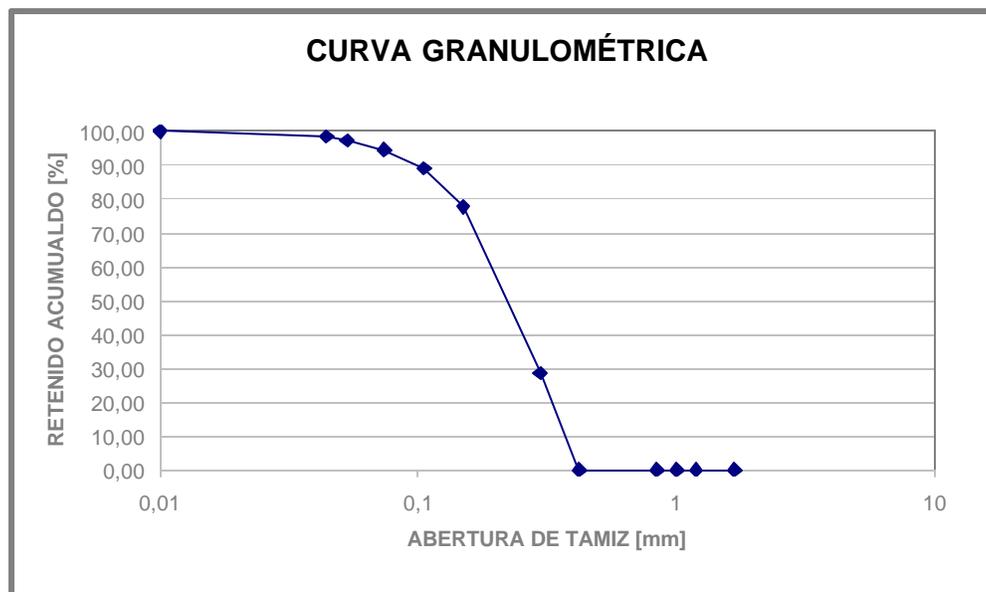


Tabla 10. Distribución Granulométrica de la Zafra Rebose

Malla Tyler / A.S.T.M.	Abertura [mm]	Peso [grs.]	Retenido [%]	Acumulado [%]
10	1,68			
14	1,19			
16	1			
20	0,841			
35	0,42	5,50	0,55	0,55
50	0,297	44,80	4,48	5,03
100	0,149	253,80	25,38	30,41
150	0,105	140,30	14,03	44,44
200	0,074	102,50	10,25	54,69
270	0,053	92,70	9,27	63,96
325	0,044	1,50	0,15	64,11
-325,00	0,01	358,90	35,89	100,00
		641,10		

Gráfico 4. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Zafra Rebose

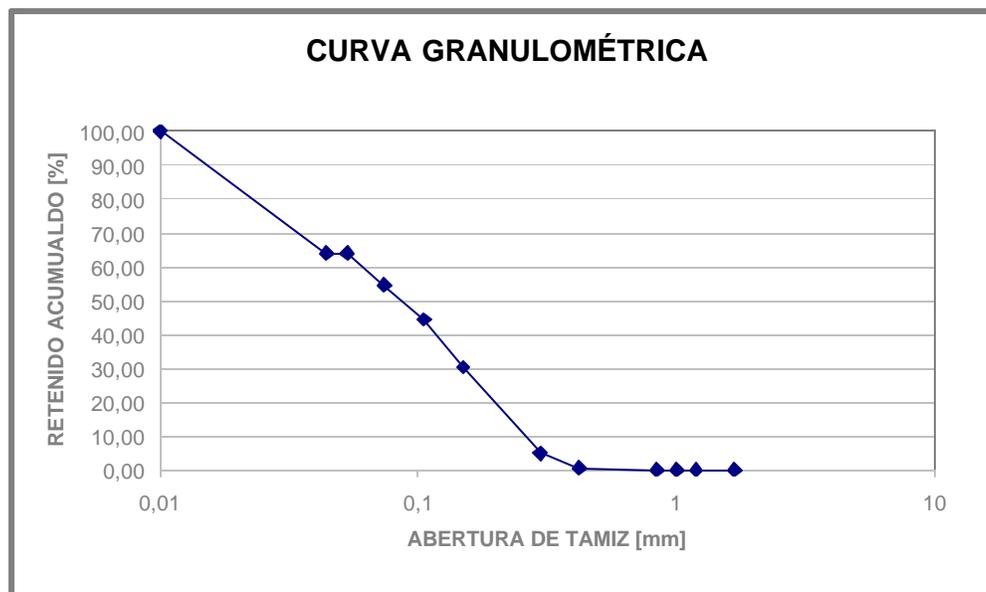


Tabla 11. Distribución Granulométrica de la Muestra Arena Lavada # 1.

Malla Tyler / A.S.T.M.	Abertura [mm]	Peso [grs.]	Retenido [%]	Acumulado [%]
35	0,42	512,90	51,29	51,29
50	0,297	222,30	22,23	73,52
100	0,149	147,10	14,71	88,23
150	0,105	104,00	10,40	98,63
-150,00	0,01	13,70	1,37	100,00
		986,30		

Gráfico 5. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Muestra Arena Lavada # 1

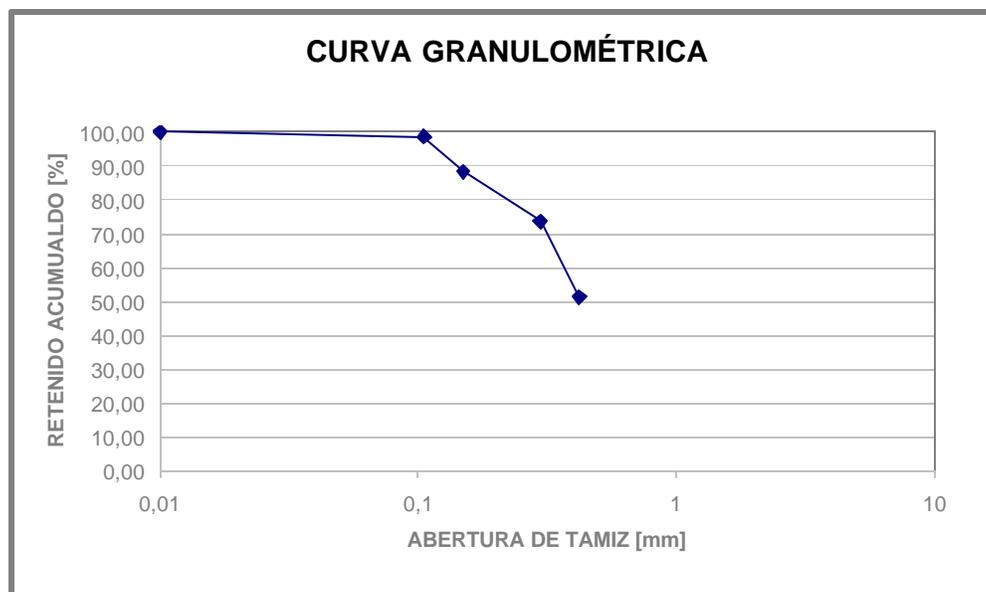


Tabla 12. Distribución Granulométrica de la Muestra Arena Lavada # 2

Malla Tyler / A.S.T.M.	Abertura [mm]	Peso [grs.]	Retenido [%]	Acumulado [%]
35	0,42	430,00	43,00	43,00
50	0,297	248,00	24,80	67,80
70	0,21	181,20	18,12	85,92
100	0,149	115,00	11,50	97,42
150	0,105	10,60	1,06	98,48
-150	0,01	15,20	1,52	100,00
		984,80		

Gráfico 6. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Muestra Arena Lavada # 2

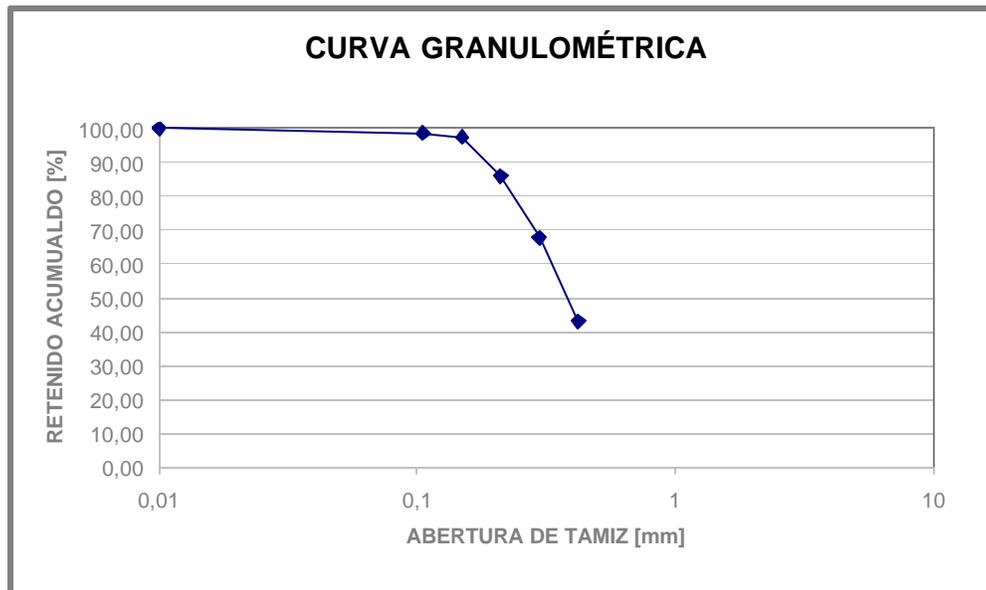


Tabla 13. Distribución Granulométrica de la Muestra P - 40

Malla Tyler / A.S.T.M.	Abertura [mm]	Peso [grs.]	Retenido [%]	Acumulado [%]
35	0,42	73,30	7,33	7,33
50	0,297	255,10	25,51	32,84
70	0,21	249,10	24,91	57,75
100	0,149	253,30	25,33	83,08
150	0,105	83,30	8,33	91,41
-150	0,01	85,90	8,59	100,00
		914,10		

Gráfico 7. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Muestra P - 40

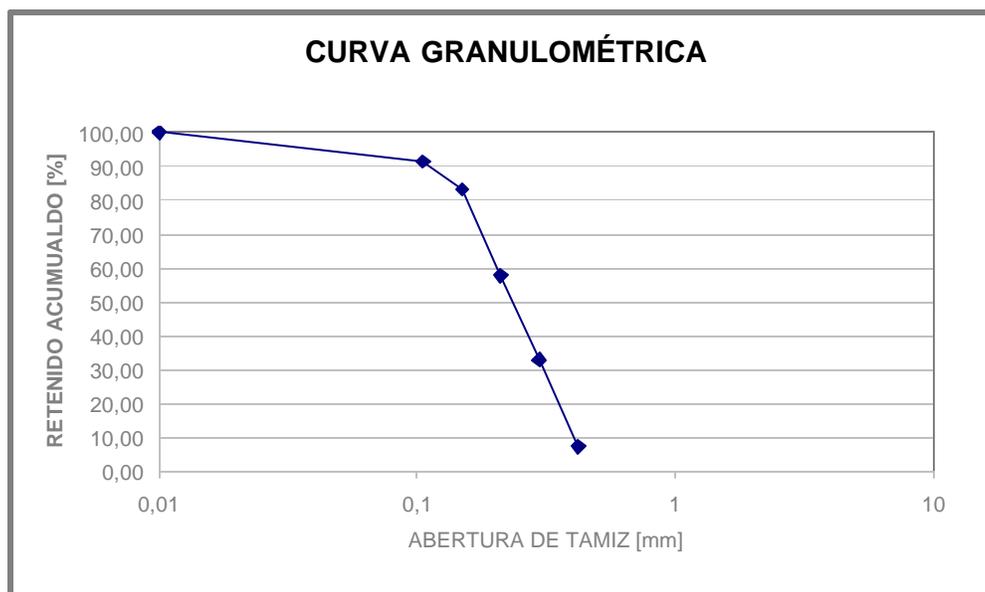
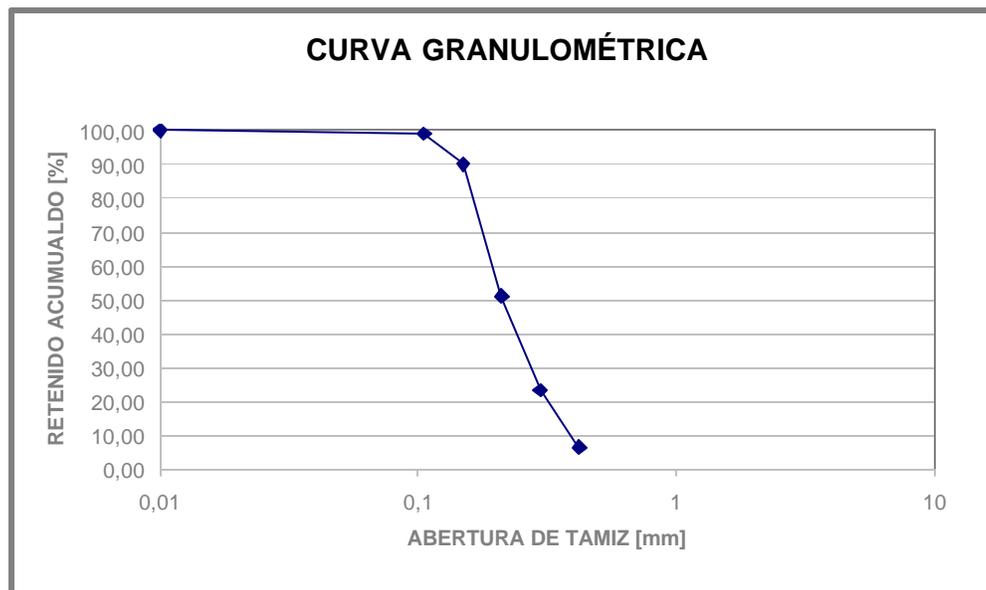


Tabla 14. Distribución Granulométrica de la Muestra Rebose

Malla Tyler / A.S.T.M.	Abertura [mm]	Peso [grs.]	Retenido [%]	Acumulado [%]
35	0,42	64,10	6,41	6,41
50	0,297	168,90	16,89	23,30
70	0,21	278,20	27,82	51,12
100	0,149	388,80	38,88	90,00
150	0,105	90,90	9,09	99,09
-150	0,01	9,10	0,91	100,00
		990,90		

Gráfico 8. Gráfico de la Distribución Granulométrica de la Muestra Rebose



De acuerdo a los análisis realizados, se puede observar que las zafras Arena Lavada # 1 y Arena Lavada # 2 tienen características granulométricas similares: ambas presentan la mayor cantidad de distribución en el intervalo -20+150: 46,70 % para la Arena Lavada #1 y 43,45 % para la Arena Lavada # 2, de igual forma se observa poco material en la malla 325: 1,37% para la Arena Lavada # 1 y 0,12 % para la Arena Lavada # 2. Luego, en el corte de malla realizado, se observó que la distribución de ambos materiales continuó siendo uniforme, presentando la mayor cantidad de distribución en la malla 35, y la menor cantidad de material para ambas muestras en la malla -150: 1,37% para la Arena Lavada # 1 y 1,52 % para la Arena Lavada # 2.

La zafra P – 40 no presentó material acumulado en el intervalo -10+35 mientras que en la malla 100 se conserva un 49% de distribución del material. Después, en el corte de malla, se observa que en el intervalo -50+100 se conserva un 50,24% de distribución del material.

La zafra Rebose no presenta retenido en ninguna de las mallas anteriores a la 20, mientras que el intervalo -50+200 representa la mayoría de la distribución con un 49,66%. Posteriormente, en el corte de malla realizado, el intervalo -50+100 representa la mayoría de la distribución con un 66,70%.

IV.2.3. Estudios de Liberación

Según Gaudin, *“el grado de liberación (f) de un mineral del género es el porcentaje que hay de dicho mineral como partícula libre, con relación al total del mismo”*. En la práctica, el grado de liberación se suele trabajar en un rango de 80 – 90 %. En esta investigación se tomó como grado de liberación la fracción de la malla –50, obtenido de estudios previos (Chiquito, 1.999). La fracción que se tomó como alimento para los ensayos de flotación estuvo comprendida entre las mallas Tyler / A.S.T.M (-50 +150).

IV.2.4. Análisis Químico para la determinación de óxidos de hierro

Para determinar cuantitativamente la concentración del contenido de óxido de hierro referido generalmente como mineral de hematita Fe_2O_3 en cada una de las cuatro muestras, se realizaron análisis químicos en el equipo de absorción atómica por espectrofotometría de llama "Perkin Elmer modelo A Analyst 300" del Laboratorio Químico Instrumental perteneciente a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela, que a continuación se muestra en la Fig. 18, donde puede apreciarse el equipo.

Fig. 18. Espectrofotómetro de Absorción Atómica



Este análisis se emplea tanto para determinar los elementos mayoritarios como los elementos minoritarios para caracterizar un mineral, debido, fundamentalmente, a la rapidez del análisis, la selectividad y la sensibilidad.

La dificultad principal estriba en la disolución del mineral. La mayoría de las muestras pueden disolverse con mezclas de ácidos en diferentes concentraciones, y en el menos conveniente de los casos, se recurre a una fusión.

La espectroscopia de absorción atómica es una técnica de análisis instrumental, capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos comprendidos en el sistema periódico. Se encarga del estudio de la absorción de la energía radiante en un rango (visible – ultravioleta) por átomos neutros en estado gaseoso.

En el ensayo por absorción atómica el elemento que se necesita estudiar debe ser llevado a su estado elemental (átomo) en forma de vapor para introducirlo en haz de la radiación originado en la fuente.

Su función está determinada por la atomización mediante una flama la solución del elemento que se determina (generalmente acuosa), se convierte en una niebla y se lleva dentro de la flama mediante un flujo de un oxidante o combustible gaseoso de óxido nitroso.

Este tipo de análisis se encuentra sustentado en la medida que cumpla la ley de Beer ($A = \log T = E \cdot b \cdot c$); en consecuencia es necesario tener en cuenta sus limitaciones, como por ejemplo: la ley describe bien el comportamiento de la absorción para soluciones diluidas en el orden de 10^{-2} M, también las desviaciones químicas y por último que dicha ley se

cumple solamente cuando la radiación empleada es monocromática, donde la absorción de un elemento es directamente proporcional a su concentración.

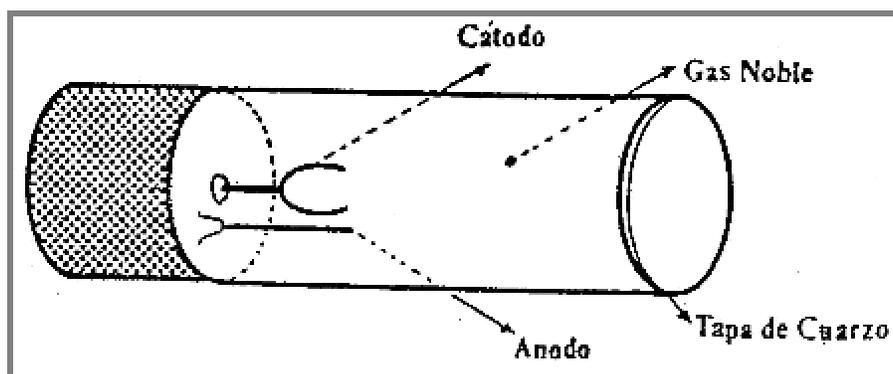
El equipo que se usa para medir la absorción atómica se denomina espectrofotómetro y está constituido por las siguientes partes: fuentes de radiación, sistema de atomización, monocromadores o filtros, flama, oxidante y combustible, registrador.

- Fuentes de radiación: Las fuentes empleadas en los espectrofotómetros de absorción atómica son lámparas de cátodo hueco (Ver Fig. 19), las cuales poseen un tubo de vidrio lleno de gas inerte de Helio o Argón, con una ventana transparente en uno de los extremos. Este tubo tiene diferentes partes, entre las que diferenciamos:

A. Ánodo: constituido por tungsteno, W, Ni, Zr.

B. Cátodo: se determinan fábrica del metal cuyo elemento se desea.

Fig. 19. Lámpara de Cátodo Hueco



FUENTE: Luis Jiménez Herraiz, Principios Fundamentales de Absorción Atómica.

Existen también lámparas de multielementos constituidas por varios elementos: cromo, manganeso, níquel, cobre o cobalto.

- Sistema de Atomización: Tiene como función transformar en átomos la solución del elemento que se necesita evaluar y se compone de:
 - A. Entrada de oxidante y combustible, estos componentes forman la llama. Por ejemplo, como oxidante se utiliza aire y óxido nítrico; y como combustible, gas natural, propano y acetileno.
 - B. Nebulizador: transforma la solución en pequeñas gotas.
 - C. Mechero: existen dos tipos de mecheros:
 - Mechero de consumo total: el oxidante y el combustible junto con la muestra llegan por conductos diferentes a la base del mechero.
 - Mechero de mezcla previa.
 - D. Llama: Existen dos tipos de llama:
 - Llama Aire-Acetileno: se utiliza en elementos fáciles de atomizar, alcanza una temperatura de 2.300 |C.
 - Llama de Óxido Nítrico – Acetileno: se utiliza para analizar elementos que tienen tendencia a formar óxidos refractorios.
- Dispensador de Radiación: utiliza un monocromador con prisma en el cual se obtiene una buena separación de longitud de onda.

- Detector: Detector fotoeléctrico el cual convierte energía radiante en energía eléctrica.
- Registrador: Equipo de lectura directa de absorbancia.

El análisis químico antes descrito se le ensayó a la muestra cabeza de mina atriccionada y a los resultados de los ensayos de flotación, tanto de concentrado como de cola.

El proceso del ataque a la muestra se encuentra descrito detalladamente en el apéndice 1 y se puede apreciar en la Fig. 20 (fusión de las muestra) y en la Fig. 21 (disolución de la muestra). Los resultados de este procedimiento se encuentran en la Tabla 15.

Fig. 20. Fundición en Horno de las Muestras en el Proceso de Análisis Químico.



Fig. 21. Agitación de las Muestras Hasta Disolver la Perla.



Tabla 15. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe₂O₃) por Absorción Atómica de la Muestra Cabeza

Muestra Cabeza	PESO CN [gr]	PESO CN* [gr]	CPPM CN	CPPM CN*	% PESO Fe ₂ O ₃ CN	% PESO Fe ₂ O ₃ CN*	PROM. PESO Fe ₂ O ₃ CN
CA	0,1020	0,1000	2,4070	2,0840	3,3711	2,9771	3,1741
CB	0,1000	0,1000	1,6000	1,6430	2,2857	2,3471	2,3164
CP	0,1020	0,1000	2,0290	2,2350	2,8417	3,1929	3,0173
CR	0,1000	0,1000	3,3290	2,9900	4,7557	4,2714	4,5136
KA	0,1020	0,1000	2,5080	1,7930	3,5126	2,5614	3,0370
KB	0,1000	0,1001	1,6070	1,6900	2,2957	2,4119	2,3538
KP	0,1010	0,1020	1,7630	1,7360	1,2468	1,2157	1,2313
KR	0,1002	0,1006	1,7890	1,8770	2,5506	2,6654	2,6080

Peso: en gramos

CN: Concentrado

CN*: Concentrado Réplica

CPPM: Concentración en partes por millón

PROM: Promedio en peso

CA: Cabeza Mina Arena Lavada # 1

CB: Cabeza Mina Arena Lavada # 2

CR: Cabeza Mina Rebose o Polvillo

CP: Cabeza Mina material P-40

KA: cabeza Atricción Arena Lavada # 1

KB: cabeza Atricción Arena Lavada # 2

KR: cabeza Atricción Rebose o Polvillo

KP: cabeza Atricción material P-40

IV.3. Diseño Experimental

Un experimento es una prueba o ensayo. Un experimento diseñado es una prueba o serie de pruebas en las cuales se inducen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema, de manera que sea posible observar e identificar las causas de los cambios en la respuesta de salida.

IV.3.1. El Diseño Experimental y sus Aplicaciones.

El Diseño Experimental es un medio de importancia crítica en el campo de la ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura. También se emplea extensamente en el desarrollo de nuevos procesos. Los métodos de diseño experimental tienen un cometido importante en el desarrollo y en la depuración de procesos para mejorar el rendimiento.

En cualquier experimento los resultados y conclusiones que pueden obtenerse dependen, en gran parte, de la forma en que los datos fueron recopilados.

Al aplicar técnicas de diseño experimental en una fase temprana del desarrollo de un proceso se puede:

- Mejorar en el rendimiento del proceso.
- Dar menor variabilidad y mayor apego a los requerimientos nominales u objetivos.
- Obtener menor tiempo de desarrollo.
- Obtener menores costos globales.

Los métodos de diseño experimental también tienen un cometido importante en las actividades de diseño técnico (o diseño de ingeniería), en las

cuales se desarrollan nuevos productos y se mejoran otros ya existentes. Algunas aplicaciones del diseño experimental en el diseño técnico son:

- Evaluación y comparación de configuraciones básicas de diseño.
- Evaluación de materiales alternativos.
- Selección de parámetros de diseño de modo que el producto funcione bien en una amplia variedad de condiciones de campo (de uso real); esto es, de modo que el producto sea consistente (robusto).

El uso del diseño experimental en estas áreas puede dar por resultado productos con mayor confiabilidad y mejor funcionamiento en el campo, menores costos, y menor tiempo de diseño y desarrollo del producto.

IV.3.2. El Diseño Factorial 2^k

Se entiende por diseño factorial 2^k aquél en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de varios factores en cada ensayo completo o réplica del experimento, para estudiar el efecto conjunto de éstos sobre una respuesta. Por ejemplo, si existen “a” niveles del factor “A” y “b” niveles del factor “B”, entonces cada réplica del experimento contiene todas las “ab” combinaciones de los tratamientos. A menudo, se dice que los factores están cruzados cuando estos se arreglan en un diseño factorial.

El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producida por un cambio en el nivel del factor. Con frecuencia, éste se conoce como efecto principal porque se refiere a los factores de interés primordial del experimento.

El primer diseño de la serie 2^k es aquel que tiene sólo dos factores, “A” y “B”; cada uno con dos niveles. Este diseño se conoce como diseño factorial 2^2 . Arbitrariamente, los niveles del factor pueden llamarse “bajo” y “alto”.

IV.3.3. Metodología

Para el diseño experimental en esta investigación se tomaron en cuenta algunas condiciones constantes en función de los ensayos exploratorios realizados establecidos a continuación:

- La granulometría del material a ensayar es el pasante de la malla 50 y retenido de la malla 150, el cual se consiguió por el grado de liberación.
- La pulpa de alimentación para la flotación se fijó con un valor de 25% de sólido, tomado 250 gr. de mineral en mil gramos de agua.
- La variable del pH de la pulpa se fijó en seis.
- Se utilizó como regulador de pH, Ácido Sulfúrico H_2SO_4 .
- Se usó como reactivo depresante Silicato de Sodio $NaSiO_2$.
- Se fijó el tiempo de acondicionamiento en 4 minutos.
- Se tomó el caudal de aire $Q = a$ 0,021 lts/seg, que representa el 100% del equipo de flotación.

Para el estudio de la concentración por flotación de los óxidos de hierro presentes en arenas silíceas en celda de flotación Denver de laboratorio se realizaron dos diseños experimentales; ésto con el fin de probar y comparar separadamente la efectividad de los colectores “sulfonato de petróleo AERO 801R, CYANAMID” y “ácidos grasos FATTY ACID 152, ARR-MAZ” en el proceso de concentración por flotación iónica inversa. Haciendo un estudio comparativo entre los colectores se define cuál reactivo es el más indicado desde el punto de vista técnico económico.

Las variables tomadas en consideración para los mismos fueron:

Para el diseño # 1

- Dosificación del colector sulfonato de petróleo, AERO 801R, CYANAMID.
- R.P.M. del motor de agitación de la máquina de flotación DENVER.

Para el diseño # 2

- Dosificación del colector ácidos grasos FATTY ACID 152, ARR-MAZ
- R.P.M. del motor de agitación de la máquina de flotación DENVER.

Cada una de estas variables se experimentaron en un diseño factorial de 2^2 , en dos niveles identificados con los números “Cero” (0) para el nivel bajo y “Uno” (1) para el nivel alto. Se denominaron de esta manera para que el estudio se hiciera más sencillo. Igualmente, se experimentó con la dosificación de los dos colectores: para el diseño # 1, el colector fue un sulfonato de petróleo (AERO PROMOTER 801 R, CYANAMID), el cual se diluyó al 10%; y para el diseño # 2 se utilizaron ácidos grasos (FATTY ACID 152, ARR-MAZ). A continuación se muestran en las siguientes tablas (Tabla 16 y Tabla 17), el ordenamiento de las variables y los niveles respectivos en cada uno de los diseños.

Tabla 16. Ordenamiento de las Condiciones Experimentales del Diseño # 1

VARIABLES	DESCRIPCION	NIVEL 0	NIVEL 1
A	AERO 801R	598 gr/tn	896 gr/tn
B	R.P.M	1200	1300

Tabla 17. Ordenamiento de las Condiciones Experimentales del Diseño # 2

VARIABLES	DESCRIPCIÓN	NIVEL 0	NIVEL 1
C	FATTY ACID 152	327 gr/tn	491 gr/tn
D	R.P.M	1200	1300

Al poner en práctica el diseño factorial de 2^2 , aplicado a cada una de las cuatro (4) muestras (Arena Lavada # 1; Arena Lavada # 2; material pasante de la malla 40 (P-40) y material Rebose o Polvillo) resultan 16 ensayos, los cuales se duplican al utilizar dos colectores diferentes, por lo que finalmente resultan 32 flotaciones. Precisamente por tener dos (2) colectores diferentes se observa un salto en la numeración de los experimentos, ya que los mismos fueron efectuados de acuerdo al material (primero las 8 flotaciones correspondientes a la Arena Lavada # 1; 4 con nivel bajo y 4 con nivel bajo, y así sucesivamente) y recopilados posteriormente conforme al colector utilizado. En las Tablas 18 y 19 se observa la distribución de las combinaciones experimentales para cada diseño.

Tabla 18. Distribución de las Diferentes Combinaciones Experimentales para el Diseño #1

N° de experimento	Nivel por variable	
	A	B
1	0	0
2	1	0
3	0	1
4	1	1
9	0	0
10	1	0
11	0	1
12	1	1
17	0	0
18	1	0
19	0	1
20	1	1
25	0	0
26	1	0
27	0	1
28	1	1

Tabla 19. Distribución de las Diferentes Combinaciones Experimentales para el Diseño #2

N° de experimento	Nivel por variable	
	C	D
5	0	0
6	1	0
7	0	1
8	1	1
13	0	0
14	1	0
15	0	1
16	1	1
21	0	0
22	1	0
23	0	1
24	1	1
29	0	0
30	1	0
31	0	1
32	1	1

IV.4. Concentración por Flotación

Los ensayos de concentración por el método de flotación iónica inversa fueron realizados en el Laboratorio de Vía Húmeda perteneciente al Departamento de Ingeniería de Minas, conjuntamente con el Laboratorio Químico Instrumental de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencias de los Materiales de la Universidad Central de Venezuela. A continuación se nombran los equipos, reactivos, materiales e instrumentos involucrados en la ejecución de los ensayos.

IV.4.1. Equipos

Los ensayos se realizaron en una celda convencional de laboratorio, marca Denver, serial N° 100067025, modelo N° 533000, Equipment Size: D-12 Flot;

con un motor AC 50/60 Hz, Hp: ¼, Volts: 115/230, AMPSR: 4.0/2.0/3.6/1.8, y R.P.M: 1425/1725 (Ver Fig. 22); la cual acepta capacidades que van desde 125 a 2000 gramos de mineral.

Fig. 22. Celda Convencional Denver de Laboratorio



Adicionalmente se utilizó un indicador de pH de Bolsillo Marca HANNA INSTRUMENTS para medir el pH de la pulpa, un cronómetro digital y una balanza digital de una capacidad máxima de 2000 gr.

IV.4.2. Reactivos

Como reactivos se utilizaron: los colectores sulfonato de petróleo (AERO PROMOTER 801R, CYANAMID) y ácidos grasos (FATTY ACID 152, ARR-MAZ), espumante (FROTHER 400, ARR-MAZ) y depresante silicato de sodio (NaSiO_2).

IV.4.3. Materiales e Instrumentos

Se utilizaron también, además de las muestras de arenas silíceas traídas de la Arenera El Pozote, Tinaquillo, Edo. Cojedes; papel de filtro Whatman N° 1 de diámetro 24 cm, bandejas de aluminio, tirro para etiquetar las muestras procesadas, bolsas plásticas de diferentes tamaños y diferentes instrumentos de laboratorio: beakers de 250 ml, pisetas, goteros, pipetas, cilindros graduados, vidrios de reloj, balones aforados, espátulas, etc.

IV.4.4. Ensayos Exploratorios

Una vez culminado el diseño experimental se procedieron a hacer los 32 ensayos exploratorios para determinar y cuantificar las variables que intervienen en el proceso de concentración por flotación iónica inversa, en celda Denver de laboratorio. Cada vez, en una celda de flotación ¹¹ de 1800 cc. se agregaron 1000 cc. de agua potable medidos en un cilindro graduado. Se encendió el equipo de flotación quien procedió a agitar el contenido, al cual se le agregaron 250 gr. de alimentación. Seguidamente se realizó la medición del pH de la pulpa, la cual fue graduada con el regulador de pH (H_2SO_4) hasta lograr un pH de 6. Inmediatamente después y de manera simultánea, se dosificó con el reactivo depresante ($NaSiO_2$) y el reactivo colector correspondiente; y transcurridos 3 minutos, se dosificó con el reactivo espumante. Se esperó 1 minuto adicional para lograr un tiempo de acondicionamiento de 4 minutos; y al culminar el mismo, se abrió la llave del caudal de aire al 100% y se cronometró el tiempo de recolección de la espuma (Ver Fig. 23), la cual fue recolectada en una bandeja de aluminio; lo que quedó

¹¹Espacio cerrado donde se realiza la concentración de un mineral metálico mediante el burbujeo de aire en una solución. Las partículas metálicas que son hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire y suben a la superficie, desde donde rebasan a canaletas que se encuentran a los costados.

en la celda se colocó en otra bandeja. Para secar las muestras se introdujeron ambas bandejas al horno por un lapso de 24 horas; se pesó tanto el útil como la ganga, y por último se etiquetaron para aplicarles posteriormente un análisis químico instrumental por el método de absorción atómica.

Fig. 23. Proceso de Recolección de la Espuma



La tabla que a continuación se presenta (Ver Tabla 20) refleja las condiciones de las pruebas exploratorias de flotación aplicadas a todas las muestras, tomando en cuenta el tipo y la dosis del colector a utilizar.

Tabla 20. Condiciones de los Ensayos Exploratorios en Celda Convencional DENVER, de Acuerdo a Cada Reactivo Colector Utilizados durante la aplicación de los dos diseños Experimentales.

CONDICIONES	ENSAYO a (nivel bajo)		ENSAYO b (nivel alto)	
Granulometría	(-50 +150) mallas			
Alimentación	250 grs.			
Dilución de la pulpa	25 % de sólidos			
PH	6			
Regulador de pH	Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)			
Reactivo Colector	Sulfonato de Petróleo AERO 801R, Cyanamid	Ácidos Grasos FATTY ACID 152, ARR-MAZ	Sulfonato de Petróleo AERO 801R, Cyanamid	Ácidos Grasos FATTY ACID 152, ARR-MAZ
Dosis de Colector	598 [gr. / tn]	327 [gr. / tn]	896 [gr. / tn]	491 [gr. / tn]
Reactivo Espumante	FROTHER 400; ARR-MAZ			
Dosis de Espumante	384 [gr. / tn]			
Reactivo Depresante	Silicato de Sodio (NaSiO ₂)			
Dosis de Depresante	613 [gr. / tn]			
Tiempo de Acondicionamiento	4 minutos			
R. P. M.	1200 (nivel bajo)		1300 (nivel alto)	
Tiempo de Flotación	6 minutos			
Caudal de Aire	Q= 0.,021 lt/seg que representa el 100% de la capacidad del motor			

IV.5. Resultados Experimentales

De los ensayos de concentración por flotación iónica inversa, tomando en cuenta el diseño experimental antes descrito, se observaron los siguientes resultados:

- La determinación de Óxidos de Hierro (Fe_2O_3) por Absorción Atómica para cada muestra se pueden visualizar en las tablas 21, 22, 23 y 24, respectivamente. En ellas se visualizan las concentraciones arrojadas en parte por millón del óxido de hierro (Fe_2O_3) así como también, el porcentaje promedio en peso de Fe_2O_3 en los concentrados y en las colas.
- Los balances de masas del porcentaje en peso del concentrado de Fe_2O_3 y su duplicado se pueden visualizar en las tablas 25, 26, 27 y 28, respectivamente. Para este diseño experimental se tomó como material de alimentación para las flotaciones el comprendido entre las mallas $-50 +150$.

Tabla 21. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe₂O₃) por Absorción Atómica de la Arena Lavada # 1

FLOT A ₁	PESO CN [gr]	PESO CN* [gr]	PESO CL [gr]	PESO CL* [gr]	CPPM CN	CPPM CN*	CPPM CL	CPPM CL*	% PESO Fe ₂ O ₃ CN	% PESO Fe ₂ O ₃ CN*	% PESO Fe ₂ O ₃ CL	% PESO Fe ₂ O ₃ CL*	PROM. PESO Fe ₂ O ₃ CN	PROM. PESO Fe ₂ O ₃ CL
1	0,1017	0,1011	0,1007	0,1011	1,6480	1,3300	1,8570	1,8770	2,3149	1,8793	6,5860	6,6306	2,0971	6,6083
2	0,1003	0,1005	0,1002	0,1003	1,4390	1,5770	2,0740	1,9420	2,0496	2,2416	7,3924	6,9150	2,1456	7,1537
3	0,1000	0,1001	0,1003	0,1003	1,3160	1,4580	2,0090	2,0030	1,8800	2,0808	7,1535	7,1322	1,9804	7,1429
4	0,1003	0,1006	0,1005	0,1004	1,4920	1,4760	1,8360	1,6360	2,1251	2,0960	6,5245	5,8196	2,1105	6,1720
5	0,1003	0,1005	0,1005	0,1004	1,3660	1,4410	2,4630	2,3680	1,9456	2,0483	8,7527	8,4234	1,9970	8,5881
6	0,1004	0,1003	0,1006	0,1004	1,4530	1,4080	2,8840	2,9970	2,0674	2,0054	10,2386	10,6609	2,0364	10,4497
7	0,1004	0,1001	0,1001	0,1003	1,5940	1,3280	2,4640	2,6700	2,2681	1,8952	8,7912	9,5072	2,0817	9,1492
8	0,1007	0,1008	0,1005	0,1005	1,3680	1,3300	3,5040	3,3220	1,9407	1,8849	12,4520	11,8053	1,9128	12,1286

Peso: en gramos

CN: Concentrado

CN*: Concentrado Réplica

CL: Colas

CL*: Colas Réplica

CPPM: Concentración en partes por millón

PROM: Promedio en peso

Tabla 22. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe₂O₃) por Absorción Atómica de la Arena Lavada # 2

FLOT A ₂	PESO CN [gr]	PESO CN* [gr]	PESO CL [gr]	PESO CL* [gr]	CPPM CN	CPPM CN*	CPPM CL	CPPM CL*	% PESO Fe ₂ O ₃ CN	% PESO Fe ₂ O ₃ CN*	% PESO Fe ₂ O ₃ CL	% PESO Fe ₂ O ₃ CL*	PROM. PESO Fe ₂ O ₃ CN	PROM. PESO Fe ₂ O ₃ CL
9	0,1002	0,1001	0,1007	0,1004	0,9590	0,8720	1,7670	1,7240	1,3673	1,2445	6,2668	6,1326	1,3059	6,1997
10	0,1008	0,1004	0,1000	0,1003	1,1530	1,0970	1,8530	1,4620	1,6341	1,5609	6,6179	5,2058	1,5975	5,9118
11	0,1004	0,1002	0,1006	0,1003	0,9340	0,9680	1,7510	1,6500	1,3290	1,3801	6,2163	5,8752	1,3545	6,0458
12	0,1003	0,1004	0,1004	0,1005	0,9020	0,9140	1,6620	1,6580	1,2847	1,3005	5,9121	5,8920	1,2926	5,9020
13	0,1004	0,1004	0,1004	0,1002	0,8840	0,9140	2,2430	2,4180	1,2578	1,3005	7,9788	8,6185	1,2792	8,2986
14	0,1006	0,1006	0,1004	0,1004	0,9110	1,1670	2,9330	2,9020	1,2937	1,6572	10,4333	10,3230	1,4754	10,3781
15	0,1007	0,1003	0,1006	0,1006	0,8150	0,8230	1,8830	1,9250	1,1562	1,1722	6,6849	6,8340	1,1642	6,7594
16	0,1002	0,1004	0,1006	0,1002	0,8570	0,8930	2,2390	2,2370	1,2218	1,2706	7,9487	7,9733	1,2462	7,9610

Peso: en gramos

CN: Concentrado

CN*: Concentrado Réplica

CL: Colas

CL*: Colas Réplica

CPPM: Concentración en partes por millón

PROM: Promedio en peso

Tabla 23. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe₂O₃) por Absorción Atómica del Material P – 40

FLOT P-40	PESO CN [gr]	PESO CN* [gr]	PESO CL [gr]	PESO CL* [gr]	CPPM CN	CPPM CN*	CPPM CL	CPPM CL*	% PESO Fe ₂ O ₃ CN	% PESO Fe ₂ O ₃ CN*	% PESO Fe ₂ O ₃ CL	% PESO Fe ₂ O ₃ CL*	PROM. PESO Fe ₂ O ₃ CN	PROM. PESO Fe ₂ O ₃ CL
17	0,1003	0,1003	0,1002	0,1003	0,5120	0,4660	0,5080	0,4870	0,7292	0,6637	1,8107	1,7341	0,6965	1,7724
18	0,1000	0,1001	0,1002	0,1000	0,5190	0,4540	0,4370	0,3950	0,7414	0,6479	1,5576	1,4107	0,6947	1,4842
19	0,1001	0,1000	0,1003	0,1003	0,4160	0,4460	0,4750	0,4040	0,5937	0,6371	1,6914	1,4385	0,6154	1,5649
20	0,1000	0,1002	0,1003	0,1003	0,3450	0,3440	0,4570	0,4750	0,4929	0,4904	1,6273	1,6914	0,4917	1,6593
21	0,1003	0,1000	0,1000	0,1001	0,1660	0,1320	4,6180	4,5560	0,2364	0,1886	16,4929	16,2552	0,2125	16,3740
22	0,1000	0,1000	0,1000	0,1003	3,0200	2,5900	1,9300	1,9590	0,4314	0,3700	6,8929	6,9755	0,4007	6,9342
23	0,1003	0,1003	0,1003	0,1000	0,2660	0,2550	1,7560	1,7970	0,3789	0,3632	6,2527	6,4179	0,3710	6,3353
24	0,1001	0,1002	0,1001	0,1001	3,3460	3,4790	2,8370	2,6910	0,4775	0,4960	10,1220	9,6011	0,4868	9,8616

Peso: en gramos

CN: Concentrado

CN*: Concentrado Réplica

CL: Colas

CL*: Colas Réplica

CPPM: Concentración en partes por millón

PROM: Promedio en peso

Tabla 24. Determinación de Óxidos de Hierro (Fe₂O₃) por Absorción Atómica del Material Rebose

FLOT Reb.	PESO CN [gr]	PESO CN* [gr]	PESO CL [gr]	PESO CL* [gr]	CPPM CN	CPPM CN*	CPPM CL	CPPM CL*	% PESO Fe ₂ O ₃ CN	% PESO Fe ₂ O ₃ CN*	% PESO Fe ₂ O ₃ CL	% PESO Fe ₂ O ₃ CL*	PROM. PESO Fe ₂ O ₃ CN	PROM. PESO Fe ₂ O ₃ CL
25	0,1002	0,1003	0,1001	0,1003	0,8460	0,8540	0,6390	0,6620	1,2062	1,2164	2,2799	2,3572	1,2113	2,3185
26	0,1001	0,1001	0,1000	0,1003	0,8250	0,7880	0,5680	0,5440	1,1774	1,1246	2,0286	1,9370	1,1510	1,9828
27	0,1004	0,1002	0,1001	0,1001	0,7870	0,7440	0,5130	0,5220	1,1198	1,0607	1,8303	1,8624	1,0903	1,8464
28	0,1003	0,1000	0,1000	0,1003	0,7560	0,7470	0,4360	0,4260	1,0768	1,0671	1,5571	1,5169	1,0720	1,5370
29	0,1001	0,1002	0,1003	0,1004	0,9430	0,8060	1,0530	0,8920	1,3458	1,1491	3,7495	3,1730	1,2475	3,4612
30	0,1000	0,1001	0,1000	0,1001	0,7470	0,7220	1,4710	1,4660	1,0671	1,0304	5,2536	5,2305	1,0488	5,2420
31	0,1002	0,1006	0,1001	0,1002	0,7260	0,7120	2,3360	2,4840	1,0351	1,0111	8,3345	8,8537	1,0231	8,5941
32	0,1002	0,1001	0,1004	0,1003	0,8320	0,8020	1,3890	1,4430	1,1862	1,1446	4,9410	5,1382	1,1654	5,0396

Peso: en gramos

CN: Concentrado

CN*: Concentrado Réplica

CL: Colas

CL*: Colas Réplica

CPPM: Concentración en partes por millón

PROM: Promedio en peso

Tabla 25. Balance de Masa de Óxidos de Hierro (Fe₂O₃) de la Arena Lavada # 1

FLOT A ₁	Peso Cab [gr]	Peso CN [gr]	Peso CL [gr]	Pérdidas [gr]	%Peso Fe ₂ O ₃ Cabeza	% Peso Fe ₂ O ₃ Cab Atricción	%Peso Fe ₂ O ₃ CN	%Peso Fe ₂ O ₃ CL	Masa Fe ₂ O ₃ Cabeza	Masa Fe ₂ O ₃ CN	Masa Fe ₂ O ₃ CL	Masa CN+CL Fe ₂ O ₃
1	250	236,0	11,0	3,0	3,1741	3,0370	2,0971	6,60	7,5925	4,9492	0,7260	5,6752
2	250	237,5	9,5	3,0	3,1741	3,0370	2,1456	7,15	7,5925	7,2129	0,6796	7,8925
3	250	235,6	9,6	4,8	3,1741	3,0370	1,9804	7,14	7,5925	7,1552	0,6857	7,8409
4	250	236,6	10,2	3,2	3,1741	3,0370	2,1105	6,17	7,5925	7,1856	0,6295	7,8151
5	250	239,5	7,0	3,5	3,1741	3,0370	1,9970	8,59	7,5925	7,2737	0,6012	7,8748
6	250	239,5	7,0	3,5	3,1741	3,0370	2,0364	10,45	7,5925	7,2737	0,7315	8,0051
7	250	239,5	7,5	3,0	3,1741	3,0370	2,0817	9,15	7,5925	7,2737	0,6862	7,9598
8	250	242,7	4,6	2,7	3,1741	3,0370	1,9128	12,13	7,5925	7,3708	0,5579	7,9288

Peso: en gramos

CN: Concentrado

CN*: Concentrado Réplica

CL: Colas

CL*: Colas Réplica

CPPM: Concentración en partes por millón

PROM: Promedio en peso

Tabla 26. Balance de Masa de Óxidos de Hierro (Fe₂O₃) de la Arena Lavada # 2

FLOT A ₂	Peso Cab [gr]	Peso CN [gr]	Peso CL [gr]	Pérdidas [gr]	%Peso Fe ₂ O ₃ Cabeza	% Peso Fe ₂ O ₃ Cab Atricción	%Peso Fe ₂ O ₃ CN	%Peso Fe ₂ O ₃ CL	Masa Fe ₂ O ₃ Cabeza	Masa Fe ₂ O ₃ CN	Masa Fe ₂ O ₃ CL	Masa CN+CL Fe ₂ O ₃
9	250	242,4	7,4	0,2	2,3164	2,3538	1,3059	6,20	5,8845	3,1655	0,4588	3,6243
10	250	242,0	8,0	0,0	2,3164	2,3538	1,5975	5,91	5,8845	5,6962	0,4728	6,1690
11	250	243,1	6,9	0,0	2,3164	2,3538	1,3545	6,05	5,8845	5,7221	0,4175	6,1395
12	250	239,9	8,5	1,6	2,3164	2,3538	1,2926	5,90	5,8845	5,6468	0,5015	6,1483
13	250	245,3	4,7	0,0	2,3164	2,3538	1,2792	8,30	5,8845	5,7739	0,3901	6,1640
14	250	246,0	3,9	0,1	2,3164	2,3538	1,4754	10,38	5,8845	5,7903	0,4048	6,1952
15	250	243,0	7,0	0,0	2,3164	2,3538	1,1642	6,76	5,8845	5,7197	0,4732	6,1929
16	250	245,2	4,8	0,0	2,3164	2,3538	1,2462	7,96	5,8845	5,7715	0,3821	6,1536

Peso: en gramos

CN: Concentrado

CN*: Concentrado Réplica

CL: Colas

CL*: Colas Réplica

CPPM: Concentración en partes por millón

PROM: Promedio en peso

Tabla 27. Balance de Masa de Óxidos de Hierro (Fe₂O₃) del Material P - 40

FLOT P-40	Peso Cab [gr]	Peso CN [gr]	Peso CL [gr]	Pérdidas [gr]	%Peso Fe ₂ O ₃ Cabeza	% Peso Fe ₂ O ₃ Cab Atricción	%Peso Fe ₂ O ₃ CN	%Peso Fe ₂ O ₃ CL	Masa Fe ₂ O ₃ Cabeza	Masa Fe ₂ O ₃ CN	Masa Fe ₂ O ₃ CL	Masa CN+CL Fe ₂ O ₃
17	250	242,2	7,8	0,0	3,0173	1,2313	0,6965	1,7724	3,0781	1,6869	0,1382	1,8252
18	250	241,9	7,9	0,2	3,0173	1,2313	0,6947	1,4842	3,0781	1,6805	0,1173	1,7977
19	250	242,8	7,1	0,1	3,0173	1,2313	0,6154	1,5649	3,0781	1,4942	0,1111	1,6053
20	250	242,0	8,0	0,0	3,0173	1,2313	0,4917	1,6593	3,0781	1,1899	0,1327	1,3227
21	250	246,5	3,5	0,0	3,0173	1,2313	0,2125	16,374	3,0781	0,5238	0,5731	1,0969
22	250	233,4	15,9	0,7	3,0173	1,2313	0,4007	6,9342	3,0781	0,9352	1,1025	2,0378
23	250	245,0	5,0	0,0	3,0173	1,2313	0,3710	6,3353	3,0781	0,9090	0,3168	1,2257
24	250	243,7	6,2	0,1	3,0173	1,2313	0,4868	9,8616	3,0781	1,1863	0,6114	1,7978

Peso: en gramos

CN: Concentrado

CN*: Concentrado Réplica

CL: Colas

CL*: Colas Réplica

CPPM: Concentración en partes por millón

PROM: Promedio en peso

Tabla 28. Balance de Masa de Óxidos de Hierro (Fe₂O₃) del Material Rebose

FLOT Reb.	Peso Cab [gr]	Peso CN [gr]	Peso CL [gr]	Pérdidas [gr]	%Peso Fe ₂ O ₃ Cabeza	% Peso Fe ₂ O ₃ Cab Atricción	%Peso Fe ₂ O ₃ CN	%Peso Fe ₂ O ₃ CL	Masa Fe ₂ O ₃ Cabeza	Masa Fe ₂ O ₃ CN	Masa Fe ₂ O ₃ CL	Masa CN+CL Fe ₂ O ₃
25	250	234,1	15,9	0,0	4,5136	2,6080	1,2113	2,3185	6,5201	2,8357	0,3686	3,2043
26	250	237,2	12,8	0,0	4,5136	2,6080	1,1510	1,9828	6,5201	2,7302	0,2538	2,9840
27	250	235,2	14,8	0,0	4,5136	2,6080	1,0903	1,8464	6,5201	2,5644	0,2733	2,8377
28	250	233,0	17,0	0,0	4,5136	2,6080	1,0720	1,5370	6,5201	2,4978	0,2613	2,7591
29	250	243,0	7,0	0,0	4,5136	2,6080	1,2475	3,4612	6,5201	3,0314	0,2423	3,2737
30	250	243,8	6,1	0,1	4,5136	2,6080	1,0488	5,2420	6,5201	2,5570	0,3198	2,8767
31	250	241,5	8,5	0,0	4,5136	2,6080	1,0231	8,5941	6,5201	2,4708	0,7305	3,2013
32	250	243,9	6,0	0,1	4,5136	2,6080	1,1654	5,0396	6,5201	2,8424	0,3024	3,1448

Peso: en gramos

CN: Concentrado

CN*: Concentrado Réplica

CL: Colas

CL*: Colas Réplica

CPPM: Concentración en partes por millón

PROM: Promedio en peso

IV.6. Discusión de Resultados

El Gráfico 9 muestra el efecto de la variable Dosis del Colector AERO 801R sobre la masa de óxidos de hierro en la espuma, perteneciente a la Arena Lavada # 1. Comparándose las flotaciones 1, 4, 2 y 3, se observa que para una dosis mayor de colector de 598 gr/tn, no garantiza que se recolecte más cantidad de óxidos de hierro, porque con ésta dosis, es suficiente para formar espumas mineralizadas de óxidos de hierro y sean recolectadas más fácilmente.

Gráfico 9. Dosis del Colector AERO 801R vs. Masa de Fe_2O_3

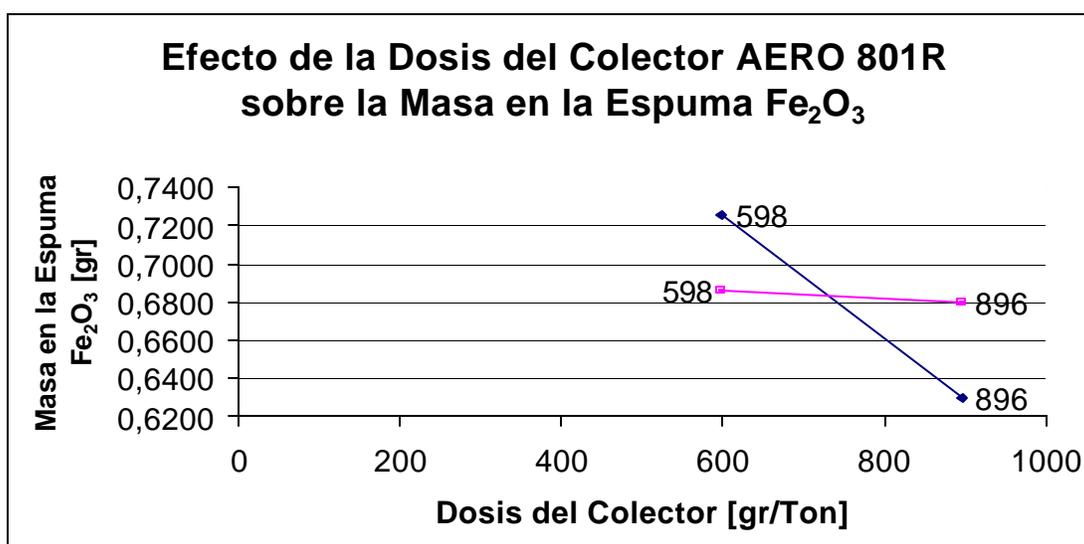


Tabla 29. Efecto del Colector AERO 801 sobre Masa de Fe_2O_3

ENSAYO DE FLOTACION	DOSIS DEL COLECTOR AERO 801R gr/tn	MASA DE Fe_2O_3
1	598	0.7260
4	896	0.6295
2	896	0,67960
3	598	0,68572

El Gráfico 10 muestra el efecto de la variable r.p.m. sobre la masa en la espuma de óxidos de hierro, perteneciente a la Arena Lavada # 1. Comparándose las flotaciones 1, 4, 2 y 3 se observa que a 1300 r.p.m hay mayor agitación del vástago del motor sobre la pulpa, produciendo turbulencia al sistema, impidiendo la adhesión del colector sobre la cantidad de óxidos de hierro contenidos en la mena

Gráfico 10. Gráfico r.p.m. Vs Masa de Fe_2O_3

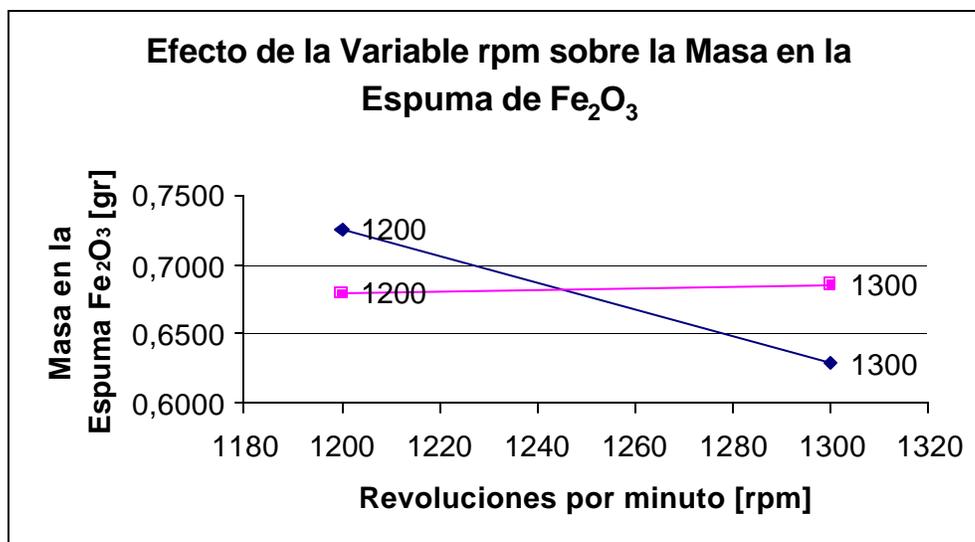


Tabla 30. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe_2O_3

ENSAYO DE FLOTACION	VARIABLE r.p.m.	MASA DE Fe_2O_3
1	1200	0.7260
4	1300	0.6295
2	1200	0,67960
3	1300	0,68572

El Gráfico 11 muestra el efecto de la variable Dosis del Colector FATTY ACID 152, sobre la masa en la espuma de óxidos de hierro pertenecientes a la Arena Lavada # 1. Comparándose las flotaciones 5, 8, 6 y 7, se observa que para las flotaciones 6 y 7 se recolectan más espumas mineralizadas de óxidos de hierro en comparación con las flotaciones 5 y 8 con las mismas dosis químicas del colector. Esto quiere decir que en estos experimentos se logró mayor hidrofobicidad.

Gráfico 11. Gráfico Dosis del Colector FATTY ACID 152, Vs Masa de Fe_2O_3

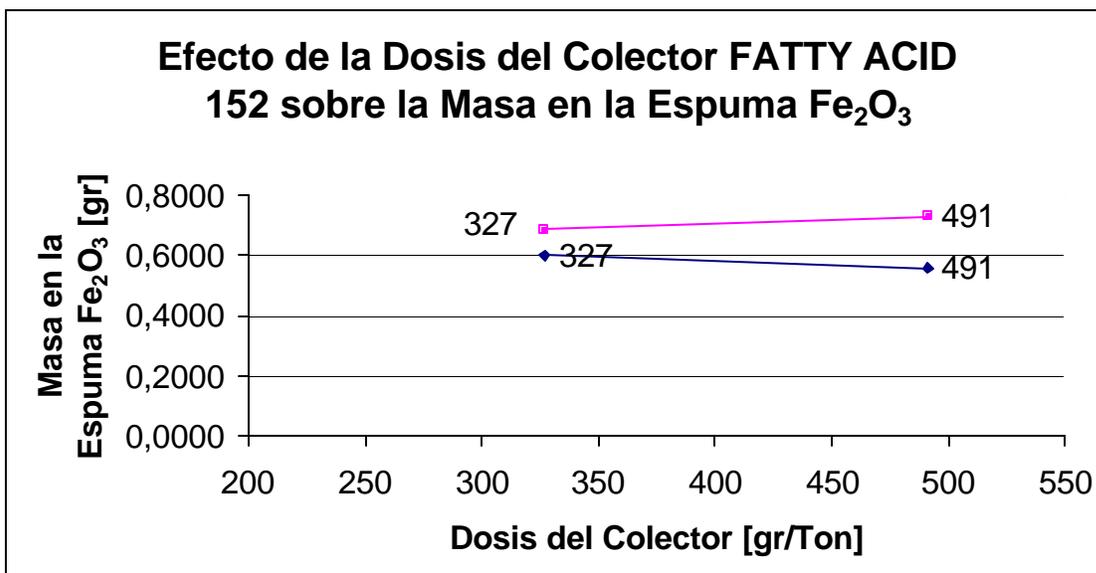


Tabla 31. Efecto del Colector FATTY ACID 152 sobre Masa de Fe_2O_3

ENSAYO DE FLOTACION	DOSIS DEL COLECTOR FATTY ACID 152 gr/tn	MASA DE Fe_2O_3
5	327	0,60117
8	491	0,55792
6	491	0,73148
7	327	0,68619

El Gráfico 12 muestra el efecto de la variable r.p.m. sobre la masa en la espuma de óxidos de hierro perteneciente a la Arena Lavada # 1. Comparándose las flotaciones 5, 8, 6 y 7, se observa que en el mínimo valor de la variable 1200 r.p.m. recolecta mayor cantidad de óxido de hierro debido probablemente a que éstas r.p.m. sean una calibración idónea del vástago del motor y esto produzca una buena adhesión entre burbuja y partícula.

Gráfico 12. Gráfico r.p.m. Vs Masa de Fe₂O₃

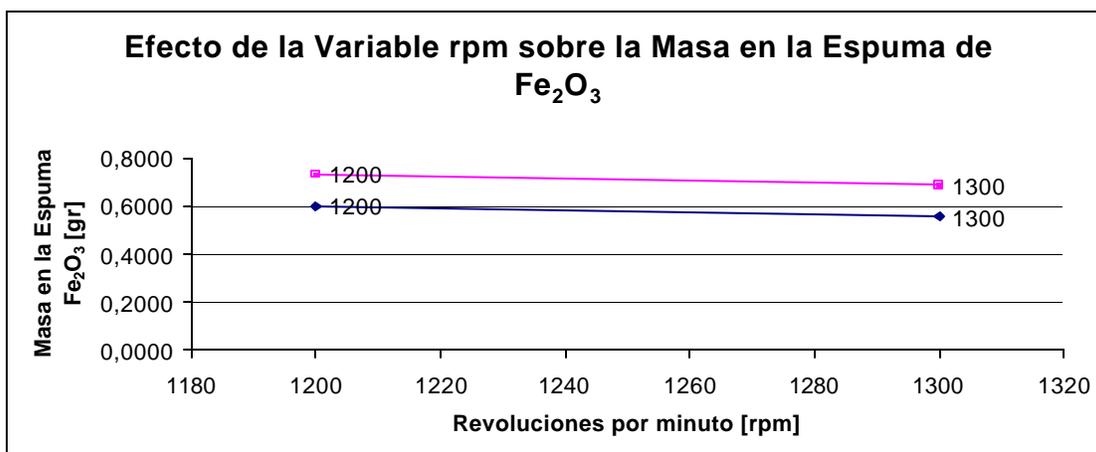


Tabla 32. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe₂O₃

ENSAYO DE FLOTACION	VARIABLE r.p.m.	MASA DE Fe ₂ O ₃
5	1200	0.60117
8	1300	0.55792
6	1200	0,73148
7	1300	0,68619

El Gráfico 13 muestra el efecto de la variable Dosis del Colector AERO 801R, sobre la masa en la espuma de óxidos de hierro, perteneciente a la Arena Lavada # 2. Comparándose las flotaciones 9, 12,10 y 11, se observa que en los ensayos de flotación 12 y 10 con una dosis de 896 gr/tn, se obtienen los mejores resultados, por lo que se logran más burbujas hidrofóbicas adheridas a partículas de óxidos de hierro.

Gráfico 13. Dosis del Colector AERO 801R, Vs Masa de Fe₂O₃

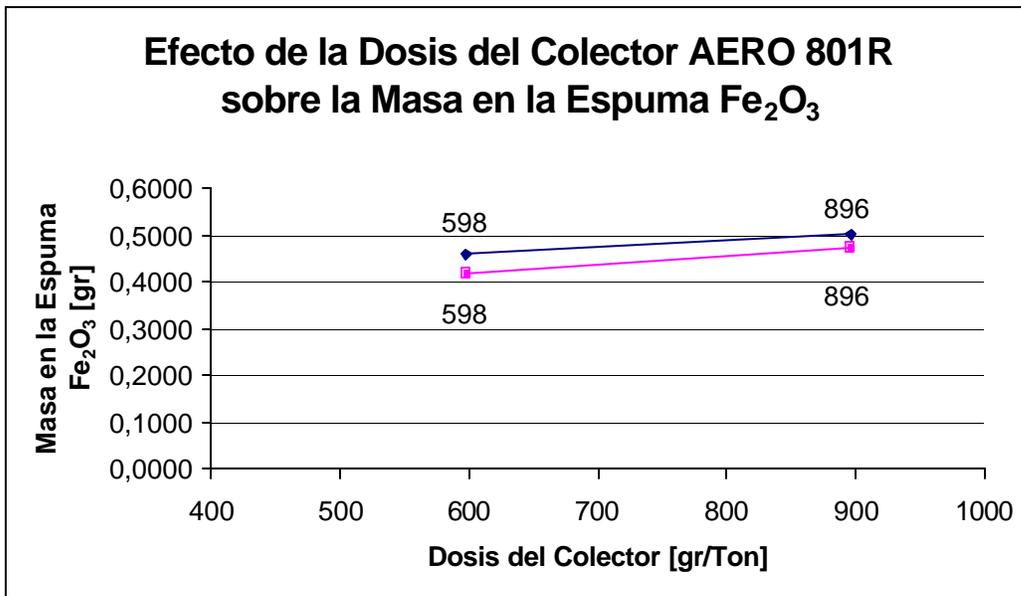


Tabla 33. Efecto del Colector AERO 801 sobre Masa de Fe₂O₃

ENSAYO DE FLOTACION	DOSIS DEL COLECTOR AERO 801R gr/tn	MASA DE FE ₂ O ₃
9	598	0.45880
12	896	0,50150
10	896	0.47280
11	598	0.41745

El Gráfico 14 muestra el efecto de la variable r.p.m. sobre la masa en la espuma de óxidos de hierro, perteneciente a la Arena Lavada # 2. Comparándose los ensayos de flotación 9, 12, 10 y 11, se observa que en las condiciones del ensayo de flotación 12 y con una agitación del motor de 1300 r.p.m, no perturba a la formación de las burbujas hidrofóbicas, y por ende, se obtienen mayor recolección de espumas de óxidos de hierro.

Gráfico 14. r.p.m. Vs Masa de Fe₂O₃

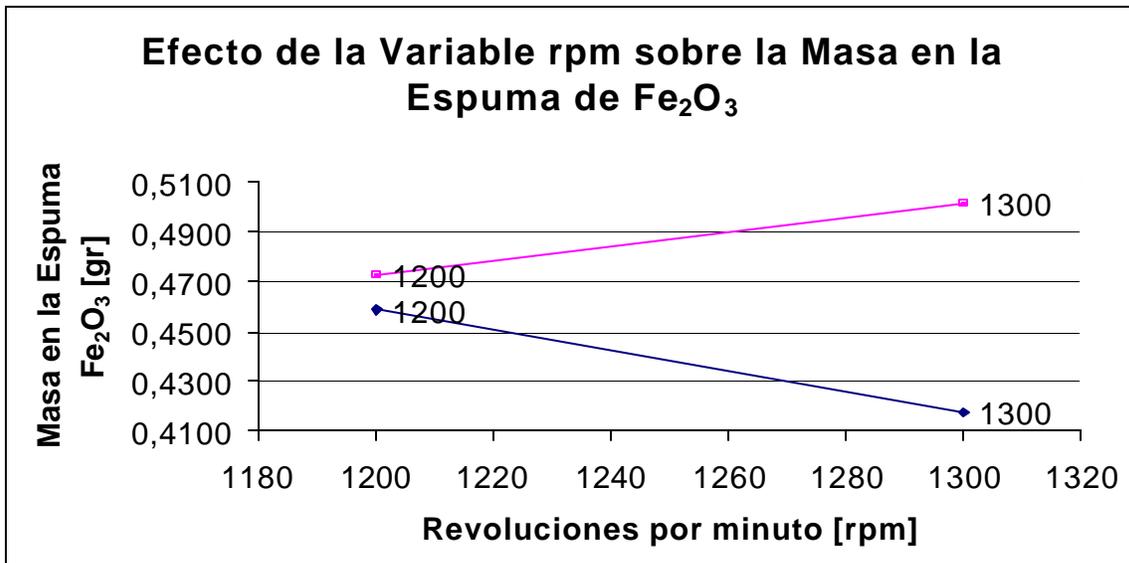


Tabla 34. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe₂O₃

ENSAYO DE FLOTACION	VARIABLE r.p.m.	MASA DE Fe ₂ O ₃
9	1200	0.45880
11	1300	0.41745
10	1200	0.47280
12	1300	0,50150

El Gráfico 15 muestra el efecto de la variable Dosis del Colector FATTY ACID 152, sobre la masa en la espuma de óxidos de hierro, perteneciente a la Arena Lavada # 2. Comparándose las flotaciones 13,16, 14 y 15, se detecta que en el ensayo de flotación 15 se logra obtener mayor hidrofobicidad mineralizadas de óxidos de hierro, con la dosis mínima de 327 gr/ton, siendo esta dosis suficiente para obtener buenos resultados. Adicionalmente con una dosis mayor de colector las burbujas se saturan y se destruyen o simplemente no se forman.

Gráfico 15. Dosis del Colector FATTY ACID 152, Vs Masa de Fe₂O₃

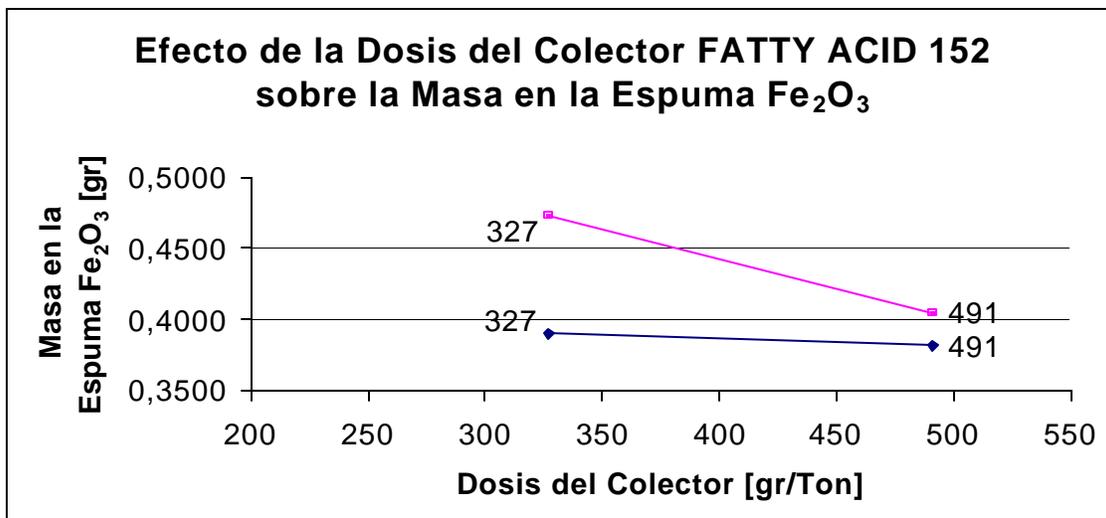


Tabla 35. Efecto del Colector FATTY ACID 152 sobre Masa de Fe₂O₃

*

ENSAYO DE FLOTACION	DOSIS DEL COLECTOR FATTY ACID 152 gr/tn	MASA DE Fe ₂ O ₃
13	327	0.39010
16	491	0.38208
14	491	0.40482
15	327	0,47320

El Gráfico 16 muestra el efecto de la variable r.p.m, sobre la masa en la espuma de óxidos de hierro, perteneciente a la Arena Lavada # 2. Comparándose las flotaciones 13, 16, 14 y 15, se observa que la variable r.p.m en su valor mínimo de 1200 r.p.m. condición del ensayo de flotación 15, se obtienen mayor cantidad de burbujas hidrofóbicas enriquecidas de óxidos de hierro, debido a que éstas r.p.m. producidas por el vástago del motor, no perturban a la burbuja y le dan más tiempo para que transporte a éstas burbujas.

Gráfico 16. r.p.m. Vs Masa de Fe₂O₃

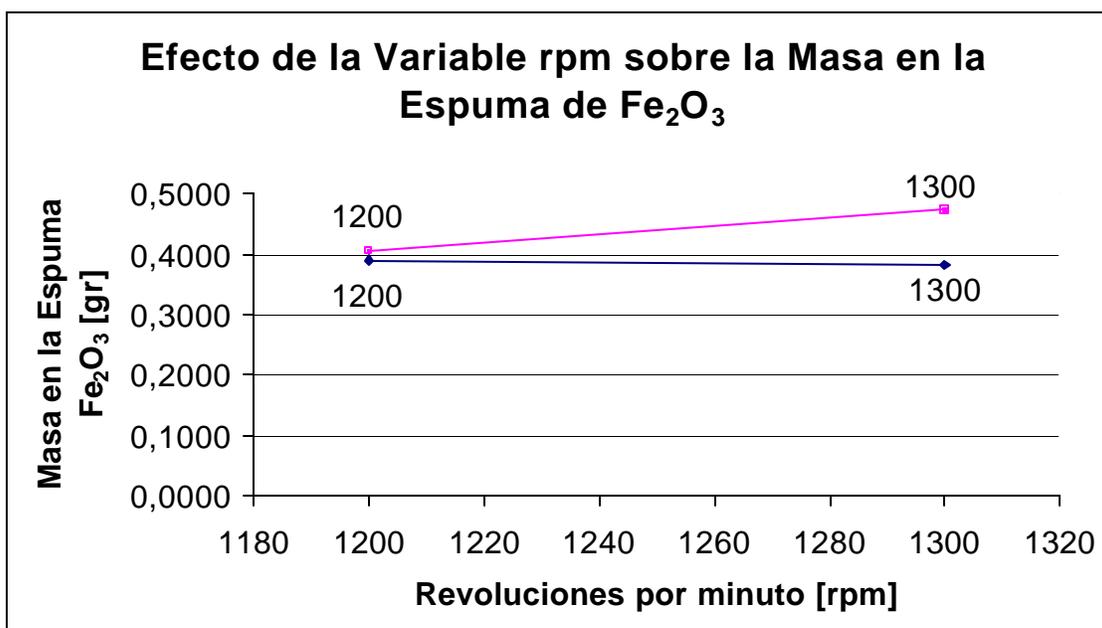


Tabla 36. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe₂O₃

*

ENSAYO DE FLOTACION	VARIABLE r.p.m.	MASA DE Fe ₂ O ₃
13	1200	0.39010
16	1300	0.38208
14	1200	0.40482
15	1300	0,47320

El Gráfico 17 presenta el efecto de la variable Dosis del Colector AERO 801R, sobre la masa en las espumas de óxidos de hierro, perteneciente a la muestra P-40. Comparándose las flotaciones 17, 20, 18 y 19, se detecta que las condiciones del ensayo 17 con una dosis mínima de colector de 598 gr/ton, mantiene más cantidad de óxidos de hierro en las espumas, porque al aumentar la dosis las burbujas se saturan, se empobrecen las espumas y por lo tanto se recolectan menor cantidad de estos óxidos.

Gráfico 17. Dosis del Colector AERO 801R, Vs Masa de Fe₂O₃

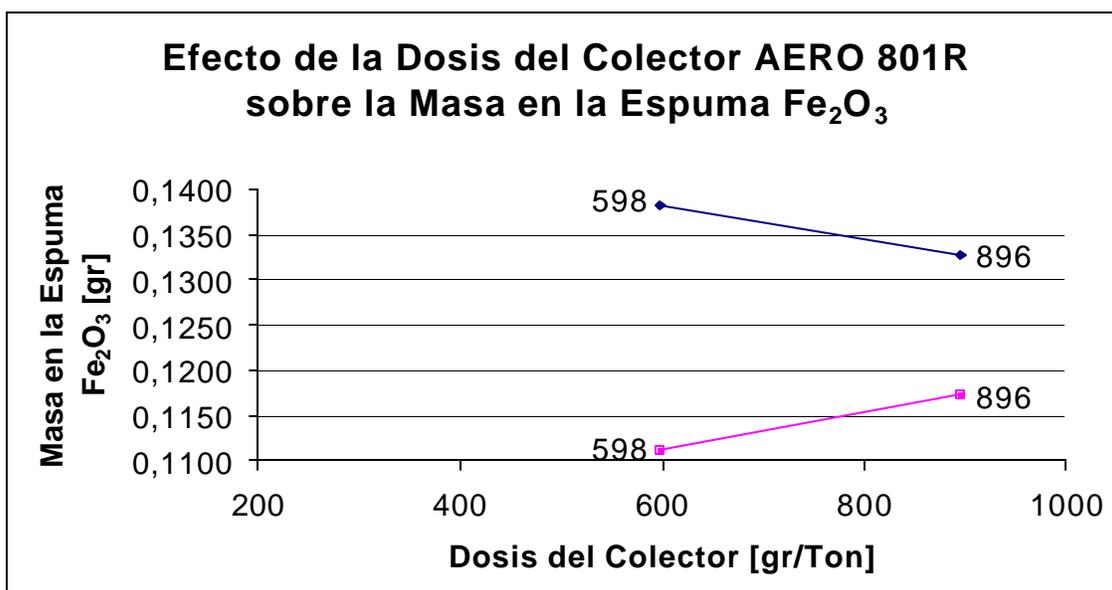


Tabla 37. Efecto del Colector AERO 801 sobre Masa de Fe₂O₃

ENSAYO DE FLOTACION	DOSIS DEL COLECTOR AERO 801R gr/tn	MASA DE FE ₂ O ₃
17	598	0.13825
20	896	0.13274
18	896	0.11725
19	598	0,11111

El Gráfico 18 presenta el efecto de la variable r.p.m. sobre la masa en las espumas de óxidos de hierro, perteneciente a la muestra P-40. Se comparan las flotaciones 17, 20, 18 y 19, se ve que a un valor mínimo de 1200 r.p.m. del motor, es condición del ensayo de flotación 17, le es suficiente para que al agitar la pulpa se logren más burbujas hidrofóbicas y por consiguiente se obtengan más óxidos de hierro. Porque al aumentar las r.p.m del motor, como la flotación 20, forma burbujas hidrofóbicas pero en menor cantidad.

Gráfico 18. r.p.m. Vs Masa de Fe₂O₃

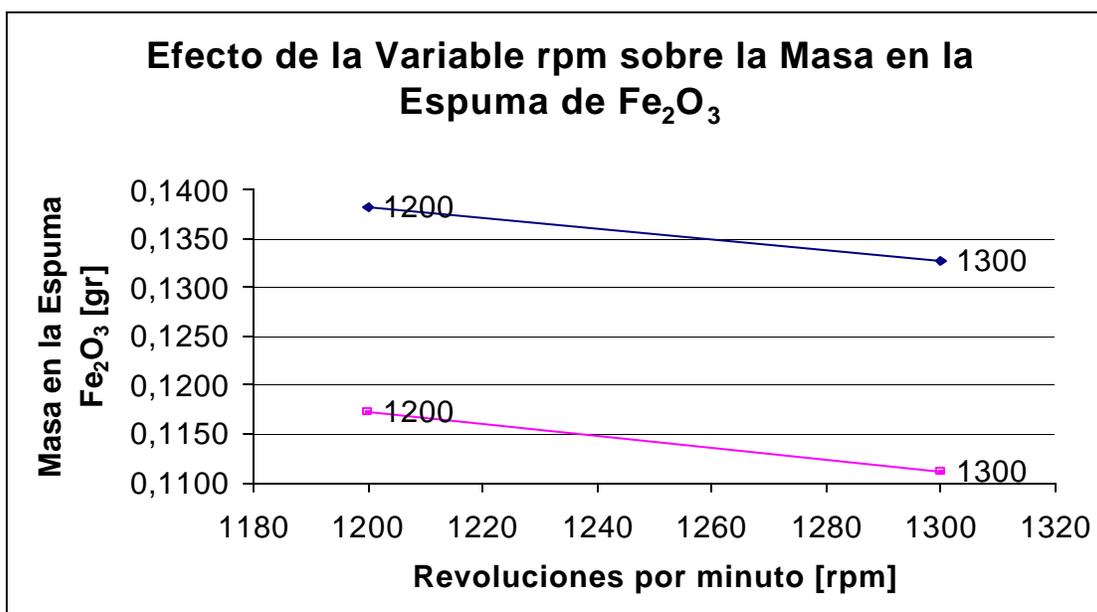


Tabla 38. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe₂O₃

ENSAYO DE FLOTACION	VARIABLE r.p.m.	MASA DE Fe ₂ O ₃
17	1200	0.13825
20	1300	0.13274
18	1200	0.11725
19	1300	0,11111

El Gráfico 19 presenta el efecto de la variable Dosis del Colector FATTY ACID 152, sobre la masa en las espumas de óxidos de hierro, perteneciente a la muestra denominada P-40. Se compararan las flotaciones 21, 22, 23 y 24, se observa que para las condiciones de dosis máxima de 491 gr/ton en el ensayo de flotación 22 y 24 se obtiene más cantidad de óxidos de hierro en las espumas.

Gráfico 19. Dosis del Colector FATTY ACID 152 Vs Masa de Fe₂O₃

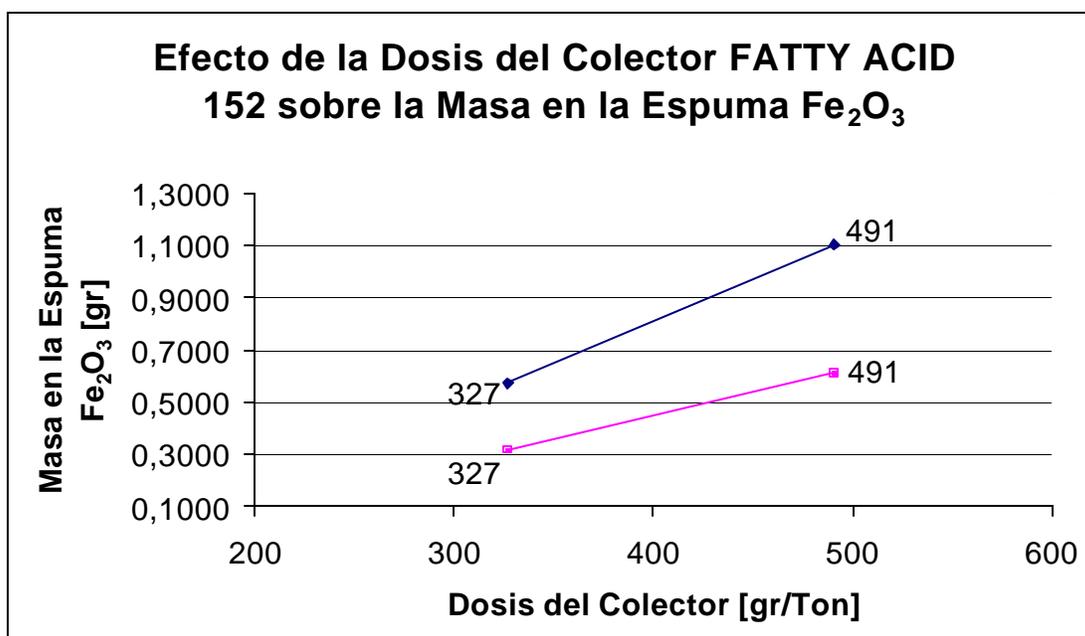


Tabla 39. Efecto del Colector FATTY ACID 152 sobre Masa de Fe₂O₃

ENSAYO DE FLOTACION	DOSIS DEL COLECTOR FATTY ACID 152 gr/tn	MASA DE FE ₂ O ₃
21	327	0,57309
22	491	1,10254
23	327	0,31677
24	491	0,61142

El Gráfico 20 porta el efecto de la variable r.p.m. sobre la masa en las espumas de óxidos de hierro, perteneciente a la muestra denominada P-40. Se comparan las flotaciones 21, 23, 22 y 24, se observa que la variable r.p.m del motor en su valor mínimo de 1200 r.p.m, favorece a la formación de las burbujas hidrofóbicas, resultando el mejor ensayo de flotación el 22, donde se captan más cantidad de espumas mineralizadas de óxidos de hierro.

Gráfico 20. r.p.m. Vs Masa de Fe₂O₃

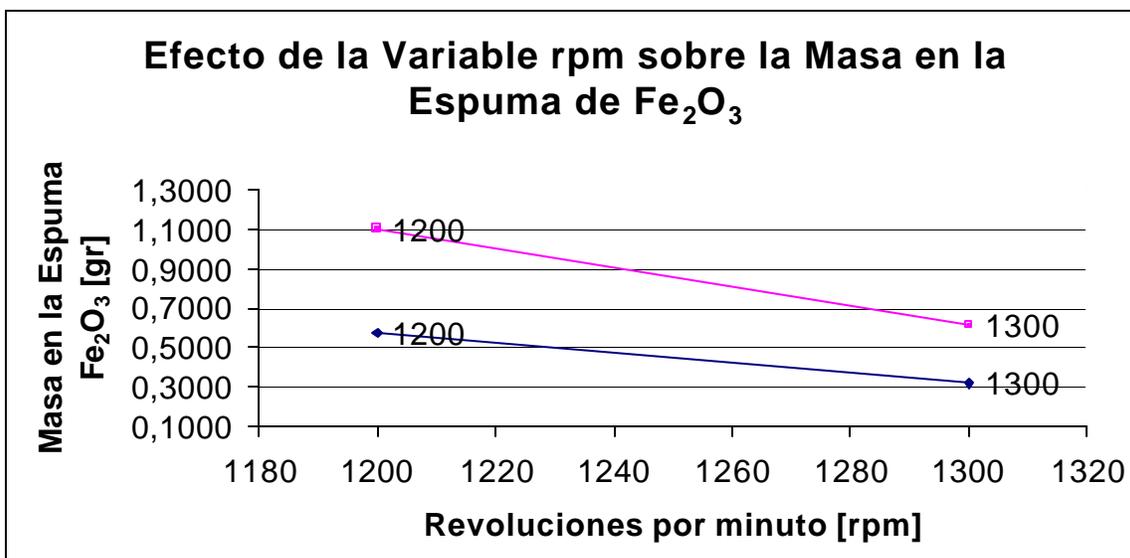


Tabla 40. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe₂O₃

ENSAYO DE FLOTACION	VARIABLE r.p.m.	MASA DE Fe ₂ O ₃
21	1200	0,57309
23	1300	0,31677
22	1200	1,10254
24	1300	0,61142

El Gráfico 21 presenta el efecto de la variable Dosis del Colector AERO 801R, sobre la masa en las espumas de óxidos de hierro, perteneciente a la muestra denominada Rebose. Se compararan las flotaciones 25, 26, 27 y 28, se observa que en las condiciones del ensayo de flotación 25 con una dosis del colector, en su valor mínimo de 598 gr/ton se obtienen mayor hidrofobicidad de las espumas mineralizadas de óxidos de hierro, por lo que es innecesario agregar más dosis de este colector.

Gráfico 21. Dosis del Colector AERO 801 sobre Masa de Fe_2O_3

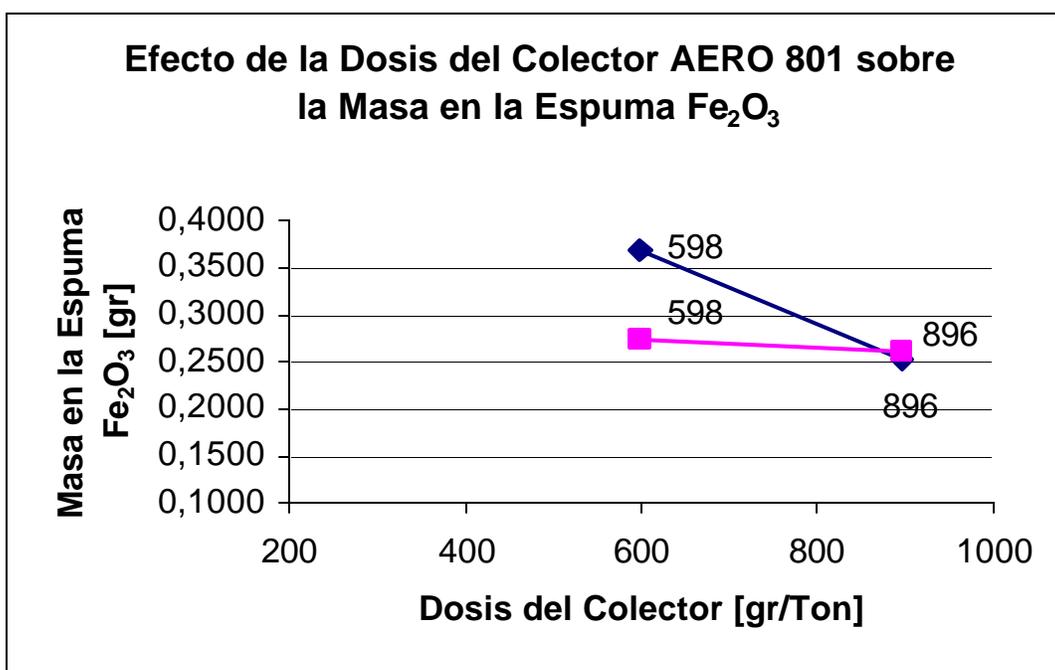


Tabla 41. Efecto del Colector AERO 801 sobre Masa de Fe_2O_3

ENSAYO DE FLOTACION	DOSIS DEL COLECTOR AERO 810R 152 gr/tn	MASA DE Fe_2O_3
25	598	0,36864
26	896	0,25380
27	598	0,27327
28	896	0,26129

El Gráfico 22 porta el efecto de la variable r.p.m. sobre la masa en las espumas de óxidos de hierro, perteneciente a la muestra denominada Rebose. Se comparan las flotaciones 25, 27, 26 y 28, se observa que en el ensayo de flotación 25 con la variable de valor mínimo 1200 r.p.m. del motor de la celda, se controla mayor grado de hidrofobicidad influyendo sobre la burbuja para que capture más mineral de óxido de hierro.

Gráfico 22. r.p.m. Vs Masa de Fe₂O₃

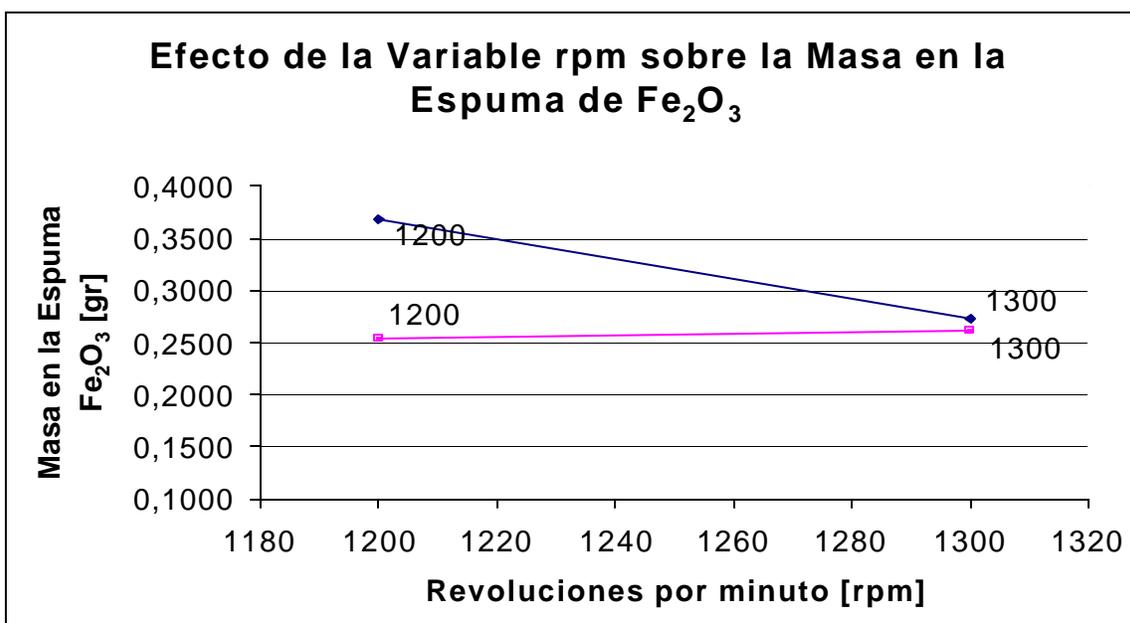


Tabla 42. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe₂O₃

ENSAYO DE FLOTACION	VARIABLE r.p.m.	MASA DE Fe ₂ O ₃
25	1200	0,36864
27	1300	0,27327
26	1200	0,25380
28	1300	0,26129

El Gráfico 23, presenta el efecto de la variable Dosis del Colector FATTY ACID 152, sobre la masa en las espumas de óxidos de hierro, perteneciente a la muestra denominada Rebose. Se compararan las flotaciones 29, 32, 30 y 31, y se observa que a una dosis mínima de 327 gr/ton del colector, se obtienen más espumas enriquecidas con partículas de óxidos de hierro. Es innecesario agregar más dosis de colector, porque al hacerlo, se disminuyen las burbujas hidrofóbicas, se destruyen o no se forman.

Gráfico 23. Dosis del Colector FATTY ACID 152, Vs Masa de Fe_2O_3

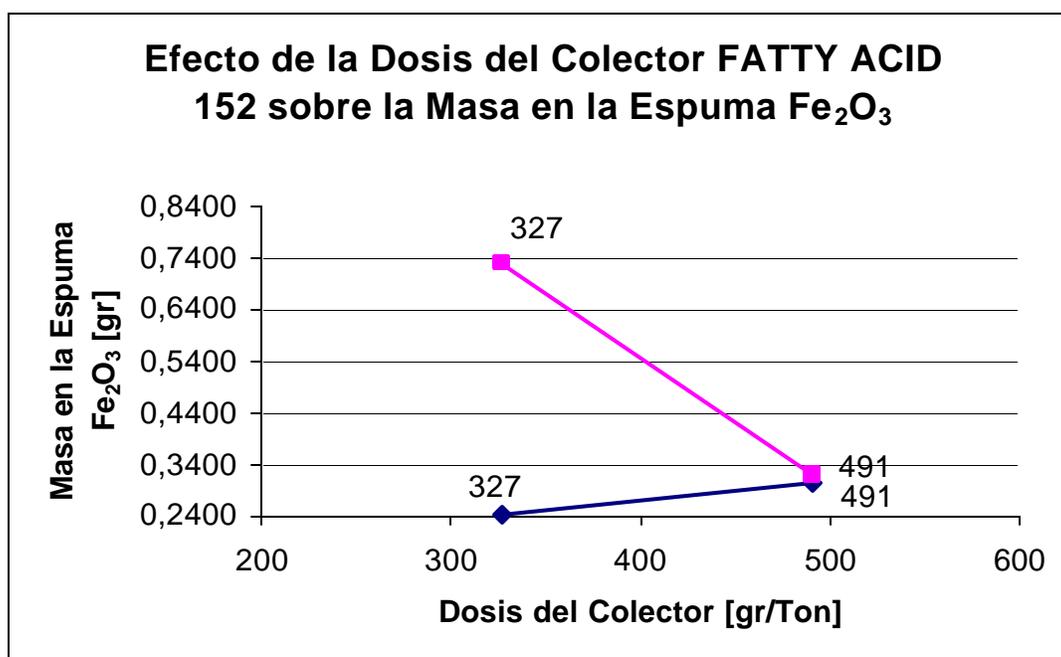


Tabla 43. Efecto del Colector FATTY ACID 152 sobre Masa de Fe_2O_3

ENSAYO DE FLOTACION	DOSIS DEL COLECTOR FATTY ACID 152 gr/tn	MASA DE Fe_2O_3
29	327	0,24228
32	491	0,30238
30	491	0,31976
31	327	0,73050

El Gráfico 24, muestra el efecto que surte la variable r.p.m. de la máquina, sobre la masa en las espumas de óxidos de hierro, perteneciente a la muestra denominada Rebose. Comparándose las flotaciones 29, 32, 30 y 31, se observa al ensayo de flotación 31 y al ajustar la máquina en sus 1300 r.p.m. éstas influyen sobre la agitación de la pulpa, dándoles el tiempo necesario a las burbujas hidrofóbicas contenidas de óxidos de hierro. De esta manera se obtenga un resultado óptimo.

Gráfico 24. r.p.m. Vs Masa de Fe₂O₃

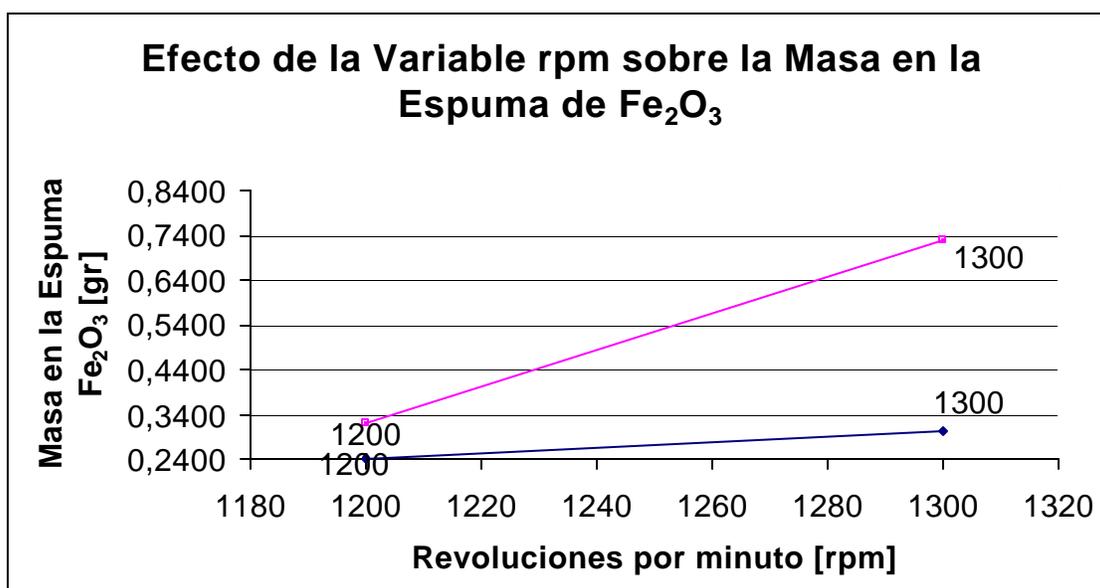


Tabla 44. Efecto de la variable r.p.m. sobre Masa de Fe₂O₃

ENSAYO DE FLOTACION	VARIABLE r.p.m.	MASA DE Fe ₂ O ₃
29	1200	0,24228
32	1300	0,30238
30	1200	0,31976
31	1300	0,73050

CONCLUSIONES

- Las muestras provenientes de la Arenera el Pozote, Tinaquillo, Edo. Cojedes, contienen SiO_2 por ser arenas silíceas, pero con impurezas de óxido de hierro como hematita Fe_2O_3 , goethita HFeO_2 , Ilmenita TiO_3Fe , Moscovita $(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})\text{HA}_2(\text{OH})_2$ y Caolinita $(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{Al}_4(\text{OH})_8$ como compuestos minoritarios.
- Aunque en el procedimiento de concentración por flotación iónica inversa ambos reactivos colectores (AERO 801R y FATTY ACID-152), cumplieron con la misión de separar las impurezas de óxido de hierro presentes en las muestras de arena silícea provenientes de la mena El Pozote, Tinaquillo, Estado Cojedes; con el colector FATTY ACID-152 se obtuvieron los mejores resultados (mayor recolección de Fe_2O_3), por lo que se determina que es el más indicado desde el punto de vista técnico económico.
- La mejor respuesta del experimento en el ensayo (donde se alcanzó mayor cantidad de Fe_2O_3 recolectado) con las condiciones de variables independientes, con la dosificación del colector (FATTY ACID-152) de 491 [gr / ton.] y 1200 r.p.m. del motor de la máquina para flotación en celda Denver. Con las variables fijas de pH =6 controlado por el ácido sulfúrico (H_2SO_4), reactivo químico depresante Silicato de Sodio (NaSiO_2) con 613 gr/ton; el reactivo espumante con dosis de 384 gr/ton, tiempo de acondicionamiento de 4 minutos tiempo de flotación de 6 minutos y el caudal de aire con $Q= 0,021$ lts/seg velocidad de flujo al 100% de la válvula.
- De la discusión de los resultados se concluye que las flotaciones 6 y 22 con las mismas combinaciones de las variables del diseño #2, es decir, dosis de colector de 491 gr/ton del FATTY ACID-152 y 1200 r.p.m. del motor de la máquina de flotación del laboratorio, son donde se alcanza más eficiencia en la recolección de espumas mineralizadas de óxidos de hierro.

RECOMENDACIONES

- Al producto de sílice obtenido en este proceso de flotación iónica inversa, de la Arenera El Pozote, Tinaquillo, Edo. Cojedes; se recomienda hacerle otra flotación con las mismas condiciones experimentales, debido a que con una sola vez, este producto todavía contiene impurezas de óxidos de hierro, que no cumple con las especificaciones del mercado.
- Se recomienda someter a la mena en estudio a un proceso de flotación iónica inversa en columna para realizar ensayos en planta piloto, con celdas en series de flotación y columna para comparar los resultados y verificar cuál de los dos métodos es más rentable.
- Igualmente se enfatiza que también se pueden ensayar otros métodos alternos para el análisis de los resultados obtenidos, que mejoren el enriquecimiento de la mena y disminuyan los costos asociados a la investigación; uno de estos métodos puede ser separación magnética.

BIBLIOGRAFÍA

Agillón, F. (1974). Minerales no Metálicos. 2da Edición. Fudeco. 39 p.

Andrades, N. (2000). Interpretación Gravimétrica del Extremo Sur-Occidental de la Cuenca Tuy – Cariaco. U.C.V., Facultad de Ingeniería, Trabajo de Grado para Maestría, Inédito.

Balestrini, M. (1998). Cómo se Elabora el Proyecto de Investigación. 2da. Edición, Caracas. Servicios Editorial. 222 p.

Bellizzia, A. 1967. Rocas ultramáficas en el sistema montañoso del Caribe y yacimientos minerales asociados. Bol. Geol., Caracas, 8(16): 159-198.

Bergaya, I. (1972). Minerales no Metálicos. U.C.V. Facultad de Economía. Tesis, Inédito.

Betejtin, A. (1977). Curso de Mineralogía. 3ra. Edición, Moscú. Editorial MIR. 739 p.

Brown, T. (1991). Química la Ciencia Central. 5ta. Edición, México. Prentice Hall. 1159 p.

Capodicassa, H. (1194) Flotación de No Metálicos Utilizando una Celda de Flotación en Columna. U.C.V., Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Tesis, Inédito.

Chiquito, D. (1999). Disminución por Métodos Magnéticos de los Niveles de Hierro en Arenas Silíceas Provenientes de la Arenera El Pozote, Tinaquillo, Estado

- Cojedes. U.C.V, Facultad de Ingeniería, Trabajo Especial de Grado, Inédito. 143 p.
- Consejo Nacional de Promoción e Inversiones CONAPRI (2005). Resumen de Minería y Siderurgia.
- Comisión Sociedad Venezolana de Geólogos. (1986). VI Congreso Geológico Venezolano. Caracas. 10. p. 6657-6836.
- Cristoveanu, I. (1985). Carrier Flotation of Hematite. Cim Bulletin. Cyamind. Mining Chemical Handbook.
- Díaz, Luis. (1994). Estudio de la Recuperación de Finos de Óxido de Hierro a Partir de Latería Ferruginosa del Estado Cojedes a Través del Método de Flotación Inversa. U.C.V., Facultad de Ingeniería, Escuela de Metalurgia, Tesis, Inédito. 86 p.
- E&MJ Library of Operatinhg Handbook. (1980). E&MJ Second Operating Handbook Of Mineral Processing. 1ra. Edición, New York. Mc. Graw Hill. 509 p.
- Flinn, R. y Torjan, P. (1979). Materiales de Minería y sus Aplicaciones. Mc. Graw Hill.
- Forte, S. (1989). Recuperación de Feldespato por el Método de Flotación a Partir de la Mena de Tinaquillo-Edo Cojedes. U.C.V. Trabajo Especial de Grado, Inédito. 157 p.
- Fuerstenau, M. (1976). Flotation A. M. Gaudin Memorial Volumen. 1ra. Edición, New York. American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, Ins. 621 p.

- Gaudin, A. (1946). Surface Area Of Flotation Concentrates And The Thickness Of Collector Coating. Aime, Mining Technol. Pub. 2002.
- Glembotskil, V. (1972). Flotation. Primary Sources. New York. 633 p.
- González de Juana, C., J. M. Iturralde y X. Picard, (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Edic. Foninvés, Caracas, 1031 p.
- Hernández, R. (1991). Metodología de la Investigación. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana de México. 505 p.
- Hiller, L. y Herber, R. (1978). Principios de Química. Editorial Eudeba.
- Hurlbut, C. Jr. (1991). Manual de Mineralogía de Dana. 3ra. Edición. Editorial Revertí S.A. 564 p.
- Hurlbut, D. (1956). Manual de Mineralogía. 16^o Edición, Barcelona. Editorial Reverté. 524 p.
- Ilis, M. (1985). Técnicas de Investigación Bibliográfica. 3ra. Edición, Caracas. Contexto-Editores. 209 p.
- Kelly & Spotiswood, (1990). Introducción al Procesamiento de Minerales. 1ra. Edición, México. Editorial Limusa. 530 p.
- Kennet, Kennet, and Raymond, E. (1992). Química General. 3ra Edición, México. McGraw-Hill. 884 p.
- Kolthoff & Sandel. (1952). Tratado de Química Analítica Cuantitativa General e Inorgánica. 3ra. Edición, Buenos Aires. Librería y Editorial Nigar, S.R.L.917 p.

- Loubet, M., B. Lambert, C. Martín y R. Maury, 1980. Estudio petroquímico y geoquímica de las rocas volcánicas del Grupo Villa de Cura y Tiara en el sistema montañoso del Caribe, Venezuela. 9a. Conf. Geol. Caribe, República Dominicana, Resúmenes, p. 41-42.
- McGuigan, F. (1996). Psicología Experimental Métodos de Investigación. 6ta. Edición, México. Prentice-Hall. 377 p.
- Menéndez V. de V., A. 1965. Geología del área de El Tinaco, centro norte del Estado Cojedes, Venezuela. Bol. Geol., Caracas, 6(12): 417-453.
- Menéndez V. de V., A. 1966. Tectónica de la parte central de las Montañas Occidentales del Caribe, Venezuela. Bol. Geol., Caracas, 8(15): 116-119
- Microsoft Corp. (2005). Biblioteca de Consulta Multimedia Encarta.
- Miller, I (1992). Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Cuarta Edición, Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México. 624 p.
- Montgomery, D. (1991). Diseño y Análisis de Experimentos. 1ra. Edición, Nebraska. Grupo Editorial Iberoamérica. 589 p.
- Morles, V. (1994). Planteamiento y Análisis de Investigación. Ediciones El Dorado. 90 p
- PDVSA (1992). Imagen de Venezuela, una visión espacial. PDVSA, Caracas, 271 p.

- PDVSA-INTEVEP y PDVSA E&P (1997) Código Geológico de Venezuela [en línea], [<http://www.pdvsa.com/lexico>].
- Peláez, E. (1975). Preparación y Concentración de Minerales 1º, 2º, 3º y 4º Parte. Caracas. Inédito. 511 p.
- Plaksin, I. (1967). Properties of Rare Metal Minerals. New York. Primary Sources.
- Rabone, P. (1932). Flotation Plant Practice. Ed. London. Mining Pub. 184 p.
- Rodríguez, S. (1986). Recursos Minerales de Venezuela. Bol. Geol. Caracas. 1(XV). Producciones Gráficas Reverón. 228 p.
- Sabino, C. (1987). Metodología de la Investigación. De el CID.
- Sivamohan, R. (1995). Recovery of Heavy from Slime. International Journal of Mineral Processing, vol 15.
- Skoog & West. Química Analítica. 6ta. Edición. México. McGraw-Hill. 612.p.
- Urbani, F. 1982. Comentarios sobre algunas edades de las rocas de la parte central de la Cordillera de la Costa. Geos, Caracas, 27: 77-84.
- Vlack, V. (1984) Materiales para Ingeniería. Editorial CECSA.

LINKS RECOMENDADOS

- <http://biblioteca.ing.ucv.ve>
- <http://www.pdvsa.com/lexico>
- <http://www.camiven.org.ve>
- <http://www.aimm-ven.org>
- <http://www.fundacite.arg.gov.ve/documentacion/fde/rocas>
- <http://www.conapri.org>.
- <http://www.areaminera.com>
- <http://www.monografias.com/trabajos17/silicatos>
- <http://www.monografias.com/trabajos/geologia>
- http://redescolar.ilce.edu.mx/redescolar/publicaciones/publi_rocas/silice.htm
- <http://www.mipunto.com/venezuelavirtual/mapas/index.jsp>
- <http://deltaarenas.com.ar>
- <http://www.kcabrasive.com>
- <http://www.abraflex.com>
- <http://www.fepa-abrasive.org>
- <http://www.washingtonmills.com>